
HYDROGEOCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES APPLIQUEE A L'EXPLORATION MINERALE – PHASE 2

Projet 2017-05

Par : Silvain Rafini, Ph.D., géo.

Juin 2018



AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non commerciales en citant la référence suivante :

Rafini, S., 2018, Hydrogéochimie souterraine appliquée à l'exploration minérale, phase 2. Rapport CONSOREM 2017-05, 85 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi

555, boulevard de l'Université

Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca

Site Web : www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Ce projet avait pour ambition de développer l'usage de l'hydrogéochimie profonde à des fins d'exploration minérale, dans les contextes du Nord québécois. En présence d'un corps métallifère, l'eau souterraine de l'aquifère de roc fracturé, en contact prolongé avec le corps, acquiert une composition géochimie anormale qui se disperse dans l'aquifère. La détection de ces empreintes secondaires dans l'eau souterraine constitue potentiellement un bon outil d'exploration, notamment pour la recherche de nouvelles zones sur des propriétés disposant déjà d'une couverture de forage. Plus spécifiquement, elle présente un intérêt majeur en exploration profonde et dans des régions à couverture transportée. Le projet se fixait pour objectif de tester la méthode en prélevant des échantillons d'eau souterraine à forte profondeur à proximité d'un sulfure massif connu, dans un secteur exempt de contaminations anthropiques, afin d'investiguer l'empreinte formée par le corps métallifère ainsi que les dimensions et la composition du panache. Le projet fait suite à une première phase réalisée par le CONSOREM (projet 2016-05) qui avait pour objectif de donner un *go/no-go*, autrement dit d'évaluer la pertinence de poursuivre davantage les expérimentations sur cette méthode. La « Phase 1 » analysait une trentaine d'échantillons dans l'environnement du sulfure massif zincifère de Phelps Dodge 1 (camp de Matagami, Abitibi), et confirmait l'existence d'une empreinte multiélément très marqué à des profondeurs faibles et moyennes, et étendu sur plusieurs centaines de mètres de distance horizontalement. Ces résultats préliminaires étaient toutefois obtenus à partir d'un faible nombre d'échantillons, et le mode opératoire était encore largement en développement. Ceci justifiait clairement de poursuivre les investigations au moyen d'un levé plus substantiel, sur un autre secteur, à des profondeurs plus grandes. La deuxième vague d'échantillonnage prévue visait à poursuivre le développement de la méthode. Plus précisément, il était nécessaire de vérifier la robustesse des conclusions préliminaires dans un autre secteur et à plus forte profondeur, et de contraindre l'influence de certains paramètres hydrogéologiques tels que le temps de résidence de l'eau. L'enjeu étant, entre autres, de vérifier si l'empreinte existe encore à forte profondeur, où le milieu devient moins oxydant, mais où les échanges eau/roche sont prolongés, et de documenter les fractionnements reliés tant au temps de contact (fractionnement vertical) qu'à la dispersion de l'empreinte (fractionnement horizontal). Par ailleurs, ce deuxième levé a permis de réaliser différents tests dans une optique de développement opératoire de la méthode, et d'établir des protocoles adaptés aux conditions climatiques et géologiques du Nord-du-Québec.

Le site du gîte Daniel 25, localisé dans le nord de l'Abitibi (camp de Matagami), a été retenu. Il s'agit d'une lentille de sulfure massif (SM) zincifère cuprifère stratiforme concordante, profonde, épaisse de 1 à 10 m, et d'extension horizontale de l'ordre du kilomètre. Cette « feuille » est encaissée dans une zone de cisaillement pentée en moyenne de 70° vers le nord et d'extension verticale atteignant 650 m et demeurant ouverte en profondeur. Le gîte est recouvert d'une couverture sédimentaire épaisse de 60 à 100 m, composée de tills à matrice dominante sableuse à fine. Un levé de 83 échantillons a été réalisé sur le gîte Daniel 25, dans 31 forages, localisés dans une zone de 5 x 1.5 km, à des profondeurs variantes entre la surface et 780 m de profondeur verticale.

La stratégie adoptée, lors de cet échantillonnage, s'élabore en trois étapes. La première étape a été d'établir un membre extrême (*end member*) géochimique robuste traduisant l'empreinte du SM en prenant plusieurs échantillons au contact et à proximité de la lentille de SM. La deuxième, de renseigner au maximum l'influence de la profondeur sur la chimie de l'eau au contact du corps métallique en contexte normal, c.-à-d., loin du sulfure massif. Ceci dans le but de disposer d'un

bon contrôle des niveaux de bases à toutes les profondeurs et d'identifier de la manière la plus robuste possible l'impact géochimique relié au corps métallique *sensu stricto*. La troisième, d'assurer le développement opératoire de la méthode (doublets de modes d'échantillonnage, extraction). Dans cette optique expérimentale, l'eau au contact de la lentille de SM a été échantillonnée abondamment à toutes les profondeurs. Quatorze différents forages ont été échantillonnés à plusieurs profondeurs incluant 8 proximaux au SM et 8 distaux. Enfin, une attention particulière a été portée sur la définition des niveaux de bases, ou régionaux, en analysant trois bases de données hydrogéochimiques régionales dans la Province du Lac Supérieur, compilées à l'occasion des programmes d'acquisitions de connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Pour finir, 10 échantillons ont été consacrés aux tests de mode opératoires : doublets et triplets combinant l'échantillonnage passif (*bailer*), à faible débit (pompe péristaltique, pas de purge) et à fort débit (purge) ; 4 aux tests d'extraction ; 3 aux blancs de terrain. Les échantillons ont été analysés par ICP-MS à haute résolution.

Les résultats révèlent la présence d'un halo hydrogéochimique extrêmement enrichi en Zn détectable à toutes les profondeurs testées. Ce halo a une forme très anisotrope, reflet de l'anisotropie de la conductivité hydraulique du roc fracturé : la distance de dispersion horizontale est d'au moins 600 m vers l'ouest (ouvert) et de moins de 100 m vers le N. Résultat particulièrement intéressant et inattendu : l'empreinte zincifère s'accentue en profondeur (facteur d'enrichissement de l'ordre de 500 à forte profondeur, et de l'ordre de 30 à faible profondeur). Ce comportement s'oppose à celui du Cu, dont l'enrichissement dans l'eau au contact du SM est plus marqué à faible profondeur. La mobilité de l'élément dans le milieu aqueux exerce donc un contrôle de premier ordre sur la persistance de l'empreinte en profondeur. Les autres éléments composant le panache sont : Co, Ni, Al, (Ce), ainsi qu'à faible profondeur, Zr, U, Y, (Mo) et à forte profondeur, Sb, V, As, (Sn). Ce bagage géochimique est sensiblement identique à celui observé dans la phase 1 du projet sur le gîte Phelps Dodge 1, à l'exception des éléments Fe et SO₄ qui ne sont pas enrichis aux alentours de Daniel 25 en raison de corps de pyrite massive dans l'environnement des échantillons distaux utilisés comme niveaux de base. Les tests expérimentaux démontrent que la méconnaissance de la profondeur du corps recherché, en contexte d'exploration (échantillonnage aveugle), n'est pas une limitation pour l'élément Zn puisque le halo est détecté aussi dans les échantillons prélevés dans des intervalles de profondeur éloignés de l'intervalle le plus proche du SM (forages proximaux). L'intérêt de la méthode pour l'exploration s'illustre remarquablement au travers des forages proximaux, n'interceptant le SM, et n'ayant aucune anomalie métallique à l'analyse de la carotte : l'analyse de l'eau dans ces forages détecte très clairement un panache zincifère, qui aurait permis de suspecter la proximité du SM en contexte d'exploration. Les tests de protocole opératoire confirment la supériorité du mode passif (*bailer*) devant les modes avec pompage.

Ce projet confirme une nouvelle méthode d'exploration ayant prouvé son efficacité dans le Bouclier canadien 1) pour la reconnaissance de nouvelles zones à l'échelle d'une propriété, 2) pour augmenter la « portée » des forages d'exploration, 3) pour l'exploration profonde. Elle livre un savoir-faire novateur avec des protocoles d'échantillonnage testés appropriés aux conditions de terrain dans le Nord québécois.

TABLE DES MATIERES

Liste des Figures.....	vi
Liste des Tableaux.....	vii
1 Introduction.....	8
1.1 Problématique de l'étude	8
1.2 Revue littéraire.....	8
1.3 Objectifs du projet.....	10
1.4 Principaux résultats de la phase 1 (2016-2017)	10
1.5 Contexte théorique.....	11
2 Cadres géologique et hydrogéologique	13
2.1 Cadre géologique	13
2.1.1 Géologie archéenne.....	13
2.2 Cadre hydrogéologique.....	19
2.2.1 Hydrostratigraphie	19
3 Méthode	21
3.1 Protocole analytique	22
3.2 QA-QC.....	23
3.3 Stratégie d'échantillonnage.....	23
4 Caractérisation hydrogéologique	25
5 Analyse de l'empreinte hydrogéochimique.....	28
5.1 Détermination des niveaux de base	28
5.1.1 Bases de données régionales.....	28
5.1.2 Niveau de base local : bons témoins et cibles potentielles	30
5.2 Halo hydrogéochimique	32
5.2.1 Résultats bruts Zn, Cu	32
5.2.2 Cartographie du panache zincifère	33
5.3 Influence de la profondeur sur l'enrichissement métallique dans l'eau	36
5.3.1 Distributions Zn et Cu en profondeur	36
5.3.2 Facteurs d'enrichissement en fonction de la profondeur	40

iv

5.3.3	Fractionnement métallique vertical et horizontal du panache hydrogéochimique : diagramme R-R	42
5.4	Influence de l'écart de profondeur de forage entre l'échantillon et la minéralisation : tests « aveugles »	43
5.5	Détection du corps métallifère par les échantillons proximaux	46
5.6	Ciblage à l'échelle de la propriété	46
6	Développement opératoire	48
6.1	Tests de mode opératoire	48
6.2	Tests d'extraction.....	51
7	Conclusions.....	54
8	Références.....	56
	Annexe 1 : Planches photos.....	59
	Annexe 2 : Détection des fractures ouvertes par l'analyse 3D des profils de température.....	63
	Annexe3 : DIAGRAMMES concentration versus élévation verticale (profondeur)	66
	Annexe 4 : Statistiques de base des valeurs obtenues	67
	Annexe 5 : QAQC	69
	Annexe 6 : Carte de localisation des forages échantillonnés.....	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation du site d'étude	13
Figure 2. Camp de Matagami, localisation du secteur de l'étude (modifié de Pilote, 2011)	15
Figure 3. Géologie du gîte Daniel 25 (modifié de SIGEOM 2015) et distribution des forages. ...	16
Figure 4. Coupe schématique du gîte Daniel 25 (tiré de Boucher et al., 2017).....	17
Figure 5. Topographie du site (DEM 50k NRCAN) superposée à la géologie quaternaire (Veillette et al., 2003). Couverture de forages de type SONIC. Les failles de socle ont été reportées (SIGEOM 2015).	19
Figure 6. Directions probables d'écoulement souterrain depuis les zones de recharge (affleurement de socle, zones sans till à matrice fine) jusqu'au secteur d'étude. Topographie du site (DEM 50k NRCAN) superposée à la géologie quaternaire (Veillette et al., 2003).	20
Figure 7. Diagramme Cl versus Br pour l'ensemble des échantillons prélevés au <i>bailer</i>	26
Figure 8. Composition de l'eau en cations et anions majeurs. TDS : <i>total dissolved solids</i>	27
Figure 9. Influence de la lithologie de l'aquifère sur le niveau de base Zn dans l'eau (BD PACES-UQAT), et comparaison avec le groupe DISTAL du levé Daniel 25.....	29
Figure 10. Statistiques de base des valeurs de Zn dans les trois BD hydrogéochimiques régionales, en comparaison aux 8 bons témoins du levé de Daniel 25.	30
Figure 11. Localisation des 3 groupes de forages : CONTACT, PROXIMAL, DISTAL.....	31
Figure 12. Concentration en Zn dans l'eau souterraine autour de la lentille zincifère de Daniel25.	32
Figure 13. Concentration en Cu dans l'eau souterraine autour de la lentille zincifère de Daniel25.	33
Figure 14. Reconstitution du panache zincifère dans l'eau souterraine en amont du corps métallifère de Daniel25, entre 280 et 430 m de profondeur verticale. Analyse des fractures ouvertes par les profils de température : voir annexe 2.	34
Figure 15. Profils de distance des panaches Zn, Cu et Co.	35
Figure 16. Vision schématique (et spéculative pour la portion aval) de la forme et de l'extension probable du panache zincifère dans l'eau souterraine émanant du corps métallifère de Daniel 25 (contour 30 ppb).....	36
Figure 17. Distribution de Zn dans l'eau souterraine selon la profondeur au contact et à proximité de la lentille Daniel 25.....	37
Figure 18. Diagramme Zn dans l'eau souterraine versus élévation (par rapport au niveau moyen de la mer).....	38

Figure 19. Diagramme Zn dans les échantillons de sulfures massifs (essais) versus élévation (par rapport au niveau moyen de la mer).....	39
Figure 20. Diagramme Cu dans l'eau souterraine versus élévation (par rapport au niveau moyen de la mer).....	40
Figure 21. Diagramme R-R des concentrations par rapport à la distance au corps métallifère, dans les tranches peu profondes et profondes du socle. La distance au SM a été établie pour chaque échantillon en calculant la distance la plus courte (en 3D) d'un essai Zn>0,5 % dans la fenêtre de profondeur ± 40 m de l'échantillon.....	43
Figure 22. Analyses et localisation des échantillons multiniveaux du groupe PROXIMAL. A) diagramme Zn versus profondeur, B) localisation des forages, fonds topographique (DEM 50k NRCAN) et géologique (SIGEOM 2015).	45
Figure 23. Analyses et localisation des échantillons multiniveaux du groupe DISTAL.	47
Figure 24. Diagramme Zn versus élévation pour les résultats de tests opératoires (doublet et triplet de protocole d'échantillonnage), avec catégories de mode opératoire.....	49
Figure 25. Diagramme Br versus Cl avec catégories de mode opératoire. Les traits pointillés et continus indiquent respectivement les échantillons <i>HF</i> et <i>LF</i>	50
Figure 26. Diagramme TDS versus élévation par rapport au niveau marin moyen, avec catégorisation de mode opératoire. Le contour pointillé indique les échantillons <i>HF</i>	51
Figure 27. Résultats des doublets d'extractions. Les valeurs sont normalisées sur la médiane.	53

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Stratégie d'échantillonnage de l'eau autour de la lentille de sulfure massif.	24
Tableau 2. Tranches d'élévation verticale des échantillons en mètres par rapport au niveau marin moyen (<i>Mean Sea Level, MSL</i>).	27
Tableau 3. Évolution des facteurs d'enrichissement au contact du SM en fonction de la profondeur	41
Tableau 4. Synthèse des analyses de roche et de l'eau pour trois forages proximaux au SM.	46

1.1 Problématique de l'étude

Dans l'environnement, les métaux se dispersent naturellement à partir des gisements métalliques. La détection de ces empreintes géochimiques diluées, mais très étendues, constitue un vecteur de premier ordre pour l'exploration des corps métalliques qui en sont la source. De fait, depuis les années 1970, les analyses de concentrations métalliques dans les sols, les sédiments glaciaires, les sédiments de ruisseaux et de fond de lacs, ont constitué un outil d'exploration privilégié par les géologues du Québec, et ont largement contribué aux découvertes. La détection de telles empreintes dans les eaux souterraines a été envisagée dès les années 1970 (p. ex., Langmuir et Chatham, 1980), mais son développement a été drastiquement retardé en raison des moyens analytiques limités de l'époque. Avec la généralisation des techniques ICP-MS et ICP-MS Haute-Résolution, cette méthode connaît un important essor dans plusieurs régions métallifères (Australie, Alaska, Espagne). Dans ces provinces, des travaux pionniers ont pu établir l'existence d'empreintes hydrogéochimiques aux environs de corps métallifères, confirmant ainsi l'utilité de ce type de levés en exploration minière. Au Nord-du-Québec, la méthode revêt un intérêt particulier puisque la plus grande partie des ressources est enfouie sous une épaisseur multimétrique de sédiments glaciaires et par conséquent invisibles depuis la surface. Les dépôts affleurants ont été largement explorés, et les efforts sont actuellement tournés vers le potentiel profond, ce qui requiert le développement d'outils novateurs adaptés. Les eaux souterraines drainent ces niveaux profonds et procurent un échantillonnage géochimique indirect du socle archéen enfoui. C'est donc un outil de prédilection pour l'exploration profonde.

L'analyse des eaux souterraines à partir de forages pourrait devenir une systématique lors des campagnes d'exploration nordiques. Elle étend la portée des informations accessibles par le forage, en complément des autres méthodes indirectes déjà utilisées en routine (géophysique : Pulse EM). Cette augmentation de l'information disponible — pour un très faible coût — a donc le potentiel d'améliorer significativement les performances de l'exploration nordique.

1.2 Revue littéraire

Un certain nombre d'études expérimentales ont évalué la méthode dans une variété de contextes métallogéniques, géologiques, climatiques et hydrogéologiques : les gîtes Spence et La Pampa au Chili (Leybourne et Cameron, 2006) ; le gîte Tillex au Canada (Gilliss et al., 2004) ; le gîte Tsumeb, en Namibie (Bowell, 2014) ; les gîtes Hinta et Kayar en Inde (De Caritat et al., 2009) ; les gîtes La Zanza et MasaValverde en Espagne (Pauwels et al., 2002) ; le gîte Wang'ershan en Chine (Quian et al., 2008) ; les gîtes St-Ives (Carey et al., 2003) et North Miitel (Noble et al., 2013), et le district minier Black Flag (Giblin et Mazzucchelli, 1997) en Australie.

S'appuyant sur un levé de 200 échantillons d'eau souterraine recueilli à moins de 10 km des trois gîtes de type SEDEX localisés en Inde, De Caritat et al. (2009) établissent que l'empreinte hydrogéochimique du gîte est rendue détectable par la normalisation sur l'élément conservateur Cl^- , en particulier les ratios Zn/Cl et $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ et As/Cl .

Les auteurs cités dans la revue montrent de plus que l'indice de saturation par rapport à des minéraux primaires ou secondaires associés à la minéralisation (p. ex., le sulfate de fer jarosite), déliné fidèlement les halos hydrogéochimiques des gîtes. Eppinger et al. (2012) mettent en évidence, par l'analyse ICP-MS à haute résolution de 168 échantillons autour du gîte Pebble (Alaska), une empreinte hydrogéochimique proximale composite dont la plupart des constituants enrichis n'auraient pas été détectés par la méthode ICP-MS quadripôle standard. En contexte aurifère, l'analyse haute résolution de 78 échantillons d'eau prélevés en forages suivant une maille kilométrique autour du gîte subaffleurant de St-Ives (Australie), révèle un enrichissement en Au, monométallique, et somme toute très proximal et superficiel (Carey, 2003). L'absence de halo profond résulte, selon l'auteur, du contexte hydrogéologique particulièrement complexe dominé par un apport profond des eaux hypersalines depuis le lac Lefroy, subissant une forte évaporation. La mesure des concentrations en Au, Pd, Pt aussi basse que 1 ppt est permise ici par une préconcentration au charbon actif (Gray, 2001) dans une aliquote dédiée de 1000 ml. Ce rôle critique des conditions hydrogéologiques et l'importance de bien les contraindre pour interpréter correctement les levés hydrogéochimiques, a aussi été mis en avant par Leybourne et Cameron (2006) lors de l'étude du cas du porphyre de Spence dans le désert Atacama (Chili). Les auteurs démontrent que l'eau échantillonnée dans l'aquifère libre à l'aplomb et en aval du gîte est fortement modifiée par un apport profond d'eau saline très mature remontant à la faveur d'un réseau de fractures, lui-même associé à la mise en place du porphyre (eau riche en Cl^- , I, Br, Li). Noble et al. (2013) montrent que le gîte nickélicifère de North Miitel (Australie), subaffleurant sous une couverture transportée peu épaisse, produit un très net halo hydrogéochimique de dimension hectométrique dans l'aquifère sus-jacent (régolithe + sédiments transportés, profondeur < 50 m), marqué par un enrichissement en Ni, Pd, Pt, (Li).

La revue littéraire révèle que, dans la plupart des cas, l'hydrogéochimie détecte efficacement l'empreinte des corps minéralisés, confirmant le potentiel de la méthode pour l'exploration locale. Toutefois, la nature de cette empreinte, les différents contrôles qu'elle subit, ainsi que les performances globales de la méthode, varient fortement d'un contexte à l'autre. Enfin, il ressort de cette compilation que les contextes de couverture glaciaire en milieu climatique boréal ne sont pas documentés. L'efficacité de cette méthode dans le contexte québécois présente donc une lacune de connaissance. De plus, ces études de cas visent des minéralisations peu profondes et échantillonnent l'aquifère superficiel et libre. Le potentiel de la méthode pour l'exploration profonde, en échantillonnant les eaux matures de l'aquifère de socle, demeure méconnu.

1.3 Objectifs du projet

Ce projet se fixe pour objectif de contribuer au développement expérimental de l'hydrogéochimie souterraine pour l'exploration minérale au Québec, à travers un échantillonnage des eaux souterraines dans le camp de Matagami. Ce camp a été retenu car il présente plusieurs lentilles non exploitées, découvertes récemment et bien caractérisées, sur des terrains vierges de toute contamination anthropique. Il constitue donc un secteur de prédilection pour investiguer la méthode.

Le projet dispose d'un financement ciblé de la part de la Société du Plan Nord, consacré intégralement à l'acquisition de données (levé, analyses). L'équipe en charge du projet est constituée de Silvain Rafini, chercheur universitaire au CONSOREM, expert hydrogéologue et métallogéniste, auteur du présent rapport ainsi que du projet 2016-05, ainsi que Réal Daigneault, Professeur de géologie à l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) et coordonnateur du CONSOREM. Le projet compte comme partenaire la compagnie GLENCORE, qui a procuré l'accès aux sites, le support logistique, ainsi que sa base de données.

1.4 Principaux résultats de la phase 1 (2016-2017)

Un premier levé réalisé en 2016 par le Consortium de recherches en exploration minérale (CONSOREM, projet 2016-05) dans le secteur de Matagami, sur le gîte Phelps Dodge 1, a démontré qu'un sulfure massif zincifère enfoui à plus de 300 mètres de profondeur produit un halo métallique détectable dans l'aquifère à des distances de plusieurs centaines de mètres du dépôt. Ce halo présente un enrichissement en Zn ainsi qu'en plusieurs éléments intermédiaires et traces mobiles dans le milieu aqueux (Fe, Se, Te, Zr, Th, SO_4^{2-}). Ce levé ne comportait que 30 échantillons, et était concentré sur un seul site. Il visait en premier lieu à vérifier l'existence du halo. Cet objectif a été atteint. Plus encore, il démontre que des forages réputés négatifs, car ayant raté de peu la lentille, auraient permis de détecter cette lentille si leur eau avait été analysée, car le halo hydrogéochimique, plus étendu, est intercepté. Toutefois, plusieurs facteurs identifiés influencent potentiellement la nature de l'empreinte et doivent être caractérisés dans l'optique d'une utilisation optimale de cette méthode en exploration : 1) les fractionnements métalliques spécifiques en contextes de forte oxygénation (gîtes sous la couverture glaciaire) ou anoxiques (gîtes enfouis dans le socle) ; 2) les facteurs hydrogéologiques (mélange avec eaux de recharge, rôle des fractures ouvertes, connexion avec aquifères de surface, etc.) ; 3) l'influence de la profondeur du forage et de l'échantillon. D'autre part, ce levé testait deux protocoles distincts d'échantillonnage : le pompage à faible débit avec purge, et l'échantillonnage passif au *bailer*.

Il a permis de reconnaître leurs avantages et inconvénients respectifs, toutefois des investigations supplémentaires sont nécessaires afin de déterminer le protocole le mieux adapté au contexte de l'exploration nordique.

1.5 Contexte théorique

Des échanges géochimiques se produisent au contact prolongé de l'eau souterraine avec un gisement métallique. En contexte relativement superficiel, autrement dit lorsque l'eau est encore relativement immature et oxydante, ces échanges impliquent une oxydation des sulfures, minéraux particulièrement labiles, qui a pour effet de détruire leur structure cristalline et de mettre en solution les éléments qu'ils contiennent, en concentration majeure ou trace. Les éléments peu solubles vont précipiter sur place sous forme de minéraux secondaires, tandis que les éléments mobiles vont être transportés dans le réseau d'écoulement souterrain pour produire un halo. **En contexte d'exploration minérale, l'interception de tels halos permet d'orienter l'explorateur vers la source métallique.** Il s'agit pour cela d'établir les traceurs adéquats, les anomalies brutes, les ratios ou associations d'éléments et les indices géochimiques.

Ces halos secondaires sont transportés par advection, qui a pour effet de diriger le halo vers l'aval hydraulique en réponse au gradient de charges, et la dispersion, qui est gouvernée par les propriétés géométriques du réseau de fractures conductrices dans le socle. La morphologie des halos est donc régie par l'orientation et l'amplitude du gradient hydraulique régional et par les conditions d'anisotropie de conductivité hydraulique du réseau de fractures. Elle est aussi déterminée par la mobilité des éléments constituant le halo. Cette mobilité est conditionnée globalement par l'acidité et le potentiel Eh de l'eau. Plus spécifiquement, la composition de l'eau en éléments majeurs détermine la disponibilité des ligands et ainsi la spéciation des éléments mineurs et traces, formant des complexes de mobilité très variable. Les cations divalents Zn, Cu, Pb, Cd, Co, Ni ont une très forte propension à se présenter sous forme libre, si bien que leur mobilité est augmentée par la diminution du pH. Ceci résulte d'une baisse d'adsorption causée par la compétition avec les ions H⁺, chargés du même signe, sur les sites non spécifiques. Ainsi, Dzombak et Morel (1990) avancent que l'adsorption des cations augmente drastiquement lorsque le pH augmente de 4 à 6, provoquant une baisse corollaire de leur mobilité.

Inversement, plusieurs éléments traces essentiellement chalcophiles associés typiquement aux minéralisations hydrothermales ont tendance à se complexer sur des ligands (hydr)oxydes pour former des (hydr)oxyanions, complexes dont la charge négative engendre une sensibilité au pH opposée à celle des cations libres : leur mobilité augmente lorsque le pH augmente. Il s'agit entre autres des éléments As, Sb, Se, Mo et V, formant typiquement les complexes H₂AsO₄⁻ ou HAsO₄²⁻, SeO₄²⁻, Sb(OH)₆⁻ ou SbO₃⁻, HMoO₄⁻ ou MoO₄²⁻, HVO₄²⁻ ou H₂VO₄⁻.

Les ligands anioniques SO₄²⁻ et Cl⁻ ont aussi pour effet d'augmenter significativement la solubilité de la plupart des cations. Cela inclut l'or, un élément extrêmement immobile, qui forme toutefois les complexes AuCl₂⁻, AuCl₃⁻, AuCl₄⁻ en présence d'eau chlorurée (Carey et al., 2003). Cet élément devient aussi soluble en présence d'iode (Gray, 1998) grâce au complexe AuI₂⁻. Gray (1998) note que ces complexes (Au-Cl et Au-I) sont instables en conditions réductrices. La mobilité de l'or dans l'eau souterraine est donc très sensible aux conditions redox du milieu, un résultat aussi observé sur des bases de données régionales par Giblin et Mazzucchelli (1997) dans les eaux salines de subsurface australiennes.

En outre, le phénomène de salinisation continentale, causé par les interactions eau-roche prolongées, implique une très forte augmentation de la concentration en Cl^- en profondeur, qui a pour effet de favoriser la formation de complexes Zn-Cl et d'accroître la solubilité de Zn en profondeur.

Le temps de résidence de l'eau dans un aquifère augmente très rapidement avec la profondeur. Gascoyne (2004) estime, par isotopie stable dans un aquifère de socle du Bouclier canadien (Manitoba), que l'eau échantillonnée à 200 m sous la surface est âgée de plusieurs siècles tandis que cet âge atteint 10^5 années et plus à partir de 400 m, approximativement.

Si ces valeurs semblent révéler la lenteur de l'écoulement dans le roc, il faut ici mentionner l'extrême complexité de la quantification du temps de résidence de l'eau dans un système hydraulique aussi hétérogène que le socle, où interagissent un écoulement rapide ségrégué dans le réseau de fractures et un écoulement extrêmement lent dans la porosité interstitielle. Le temps prolongé de résidence de l'eau dans le socle implique des échanges eau-roche importants qui modifient progressivement la composition géochimique de l'eau. Cette maturation de l'eau reflète la géochimie des formations aquifères traversées ainsi que l'aptitude des minéraux à se météoriser.

Proche de la surface, le potentiel redox Eh est régi par l'oxydation de la matière organique et la respiration bactérienne. Plus en profondeur, lorsque toute la matière organique est désintégrée, la consommation de l'oxygène dissous et la diminution de Eh sont régis par l'oxydation de Fe (II) contenu dans les minéraux hôtes ferrières, essentiellement biotite, pyrite, magnétite. Eh devient donc contrôlé par le tampon Fe (II) -Fe (III).

2 CADRES GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le secteur du levé est le gîte Daniel 25, un gîte atypique d'affinité de type sulfure massif volcanogène (SMV) est situé dans le camp minier de Matagami, au nord de la ceinture de roches vertes archéennes de l'Abitibi, Québec, Canada (Fig. 1). Le camp de Matagami est un district de SMV regroupant 20 dépôts dont la moitié sont économiques et caractérisés par des teneurs en Zn particulièrement élevées (9 % en moyenne, Genna, 2015), pour une production historique totale de 50 Mt de minerai depuis les années 60.

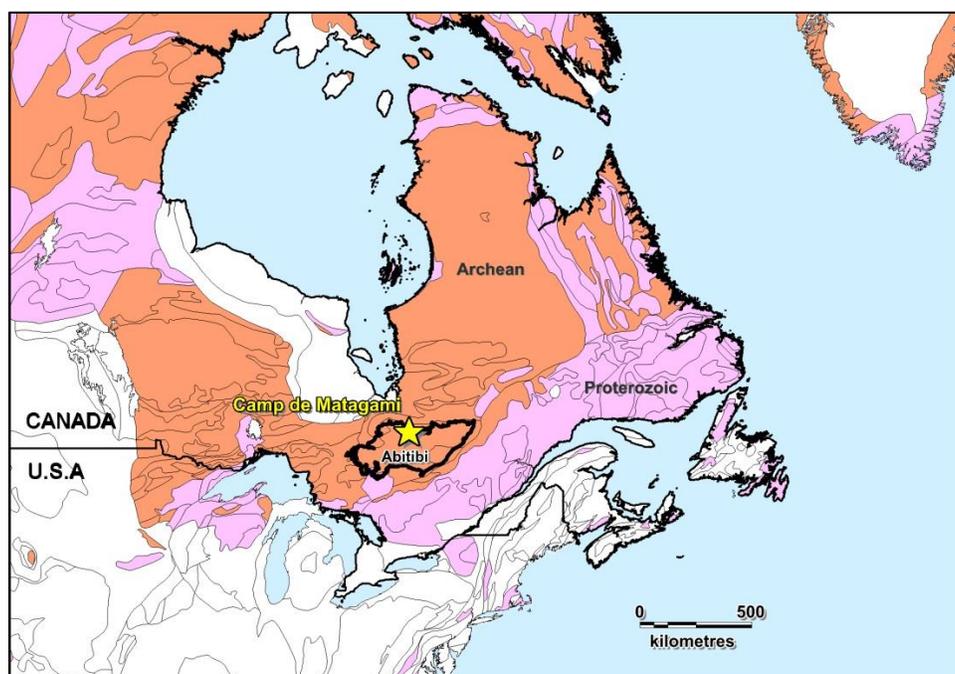


Figure 1. Localisation du site d'étude

2.1 Cadre géologique

2.1.1 Géologie archéenne

2.1.1.1 Géologie régionale

La ceinture de roches vertes de la sous-province de l'Abitibi résulte de l'accrétion diachrone du nord vers le sud de bassins volcano-sédimentaires formé entre 2735 et 2698 Ma, séparés par de larges ensembles plutoniques synvolcaniques à syntectoniques essentiellement de la série TTG (Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite), orientés globalement E-W, assimilables à des arcs insulaires (Daigneaut et al., 2002). Certains ensembles plutoniques de la partie orientale de la

sous-province sont interprétés comme des fenêtres de la semelle crustale profonde, métamorphisée à un plus haut grade.

La sous-province a subi une tectonique polyphasée entre 2695 et ca 2670 Ma (Daigneault et al., 2002), dominée par une verticalisation précoce des couches et un raccourcissement subséquent N-S marqué par la formation de larges plis E-W dont les cœurs synclinaux sont portés par les bassins volcano-sédimentaires et les cœurs anticlinaux par les arcs plutoniques, plus rigides et moins déformés.

2.1.1.2 Géologie locale

Le camp de Matagami est localisé au nord de la sous-province de l'Abitibi. Il est constitué (Fig. 2) : 1) des unités volcaniques des Groupes de Watson (2726,3 – 2722,4 Ma), essentiellement felsiques, et de Wabasee, plus jeune, essentiellement mafiques et 2) du complexe de la rivière Bell, une intrusion litée de gabbro-anorthosite datée à 2724,6 Ma (Mortensen, 1993). Ce complexe, formant le cœur d'un large anticlinal orienté NO-SE, est interprété comme le moteur thermique des systèmes SMV mis en place sur son flanc sud et son flanc nord. Les minéralisations dans ces secteurs sont systématiquement associées à la « tuffite clé », un horizon exhalatif à composante tuffacée. Genna (2015) démontre le rôle dominant de l'altération hydrothermale post-exhalaison dans la formation de cet horizon. En particulier, l'auteur avance que la minéralisation est synchrone de ces altérations, de sorte que les SMV seraient épigénétiques, formés par remplacement hydrothermal et non par précipitation sur le plancher océanique d'un panache métallifère émanant de fumerolles sous-marines. Le métamorphisme régional est de niveau schiste vert.

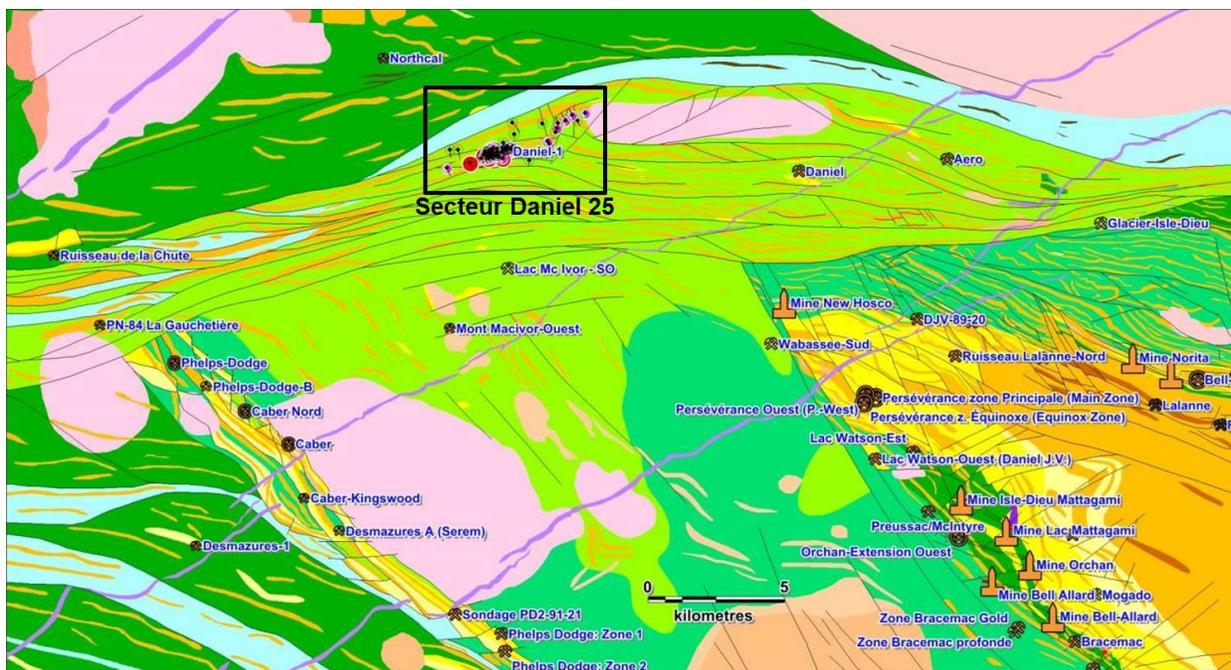


Figure 2. Camp de Matagami, localisation du secteur de l'étude (modifié de Pilote, 2011)

2.1.1.3 Géologie du gîte Daniel 25

Le contenu des sections suivantes est tiré du rapport des travaux de la compagnie Glencore (Boucher et al., 2017).

Le gîte Daniel 25 est localisé à 10 km au NO du complexe de la rivière Bell. (Fig.3). Il est encaissé dans le Groupe d'Enjalran-Bapst, une unité composée d'un assemblage d'andésite, de dacite, de rhyolite et de tuf indifférencié, formant une bande de direction est/ouest d'une largeur d'environ 3,5 km (Boucher et al., 2017). Les volcanites mafiques y sont prédominantes. Des niveaux décimétriques de rhyolite et de tufs ont été intersectés par les forages d'exploration. Le Groupe d'Enjalran-Bapst comporte également des bandes de sédiments détritiques et des horizons graphiteux qui sont interdigités dans les volcanites.

Cette unité recoupe le groupe de Wabassée au nord. Il est en contact failté avec l'Opatoca, au nord, et avec le Domaine Sud (zone de cisaillement de la rivière Allard du groupe de Wabassée) au sud (Boucher et al., 2017).

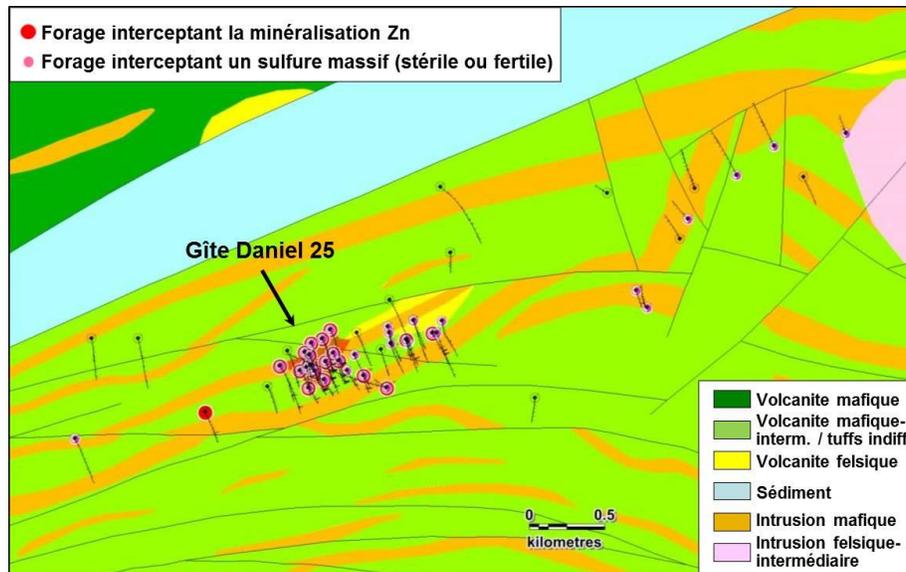


Figure 3. Géologie du gîte Daniel 25 (modifié de SIGEOM 2015) et distribution des forages.

L'horizon porteur du gîte Daniel 25 s'apparente, à l'échelle régionale, à un large couloir de déformation orienté ENE-OSO continu sur plusieurs dizaines de kilomètres, avec un pendage moyen de 75° vers le NE. Plusieurs failles ont été interceptées en forage, montrant des styles variés entre les domaines ductiles ou cassants. Ces structures forment vraisemblablement un système anastomosé.

La disposition et l'allure du corps minéralisé Daniel 25 sont illustrées par la coupe schématique (Fig. 4) et la photo 1. La lentille est encaissée dans des tufs intermédiaires. Il s'agit d'un corps de sulfures massifs (SM) zincifères cuprifères d'une puissance moyenne de 4 mètres (entre 0,1 et 10,3 m), une extension verticale minimale de 300 m (ouvert en profondeur) et une extension horizontale minimale de 1000 mètres, très approximativement. Le corps métallique est stratiforme et concordant. Son attitude est N235/60°NE, suivant la stratification. Les substances Cu et Zn sont respectivement portées par la chalcoppyrite et forme de sphalérite de couleur blanche appauvrie en Fer (métasomatisée ?), très bien visible sur la photo 1. Le SM contient peu de magnétite et pas de pyrrhotite.

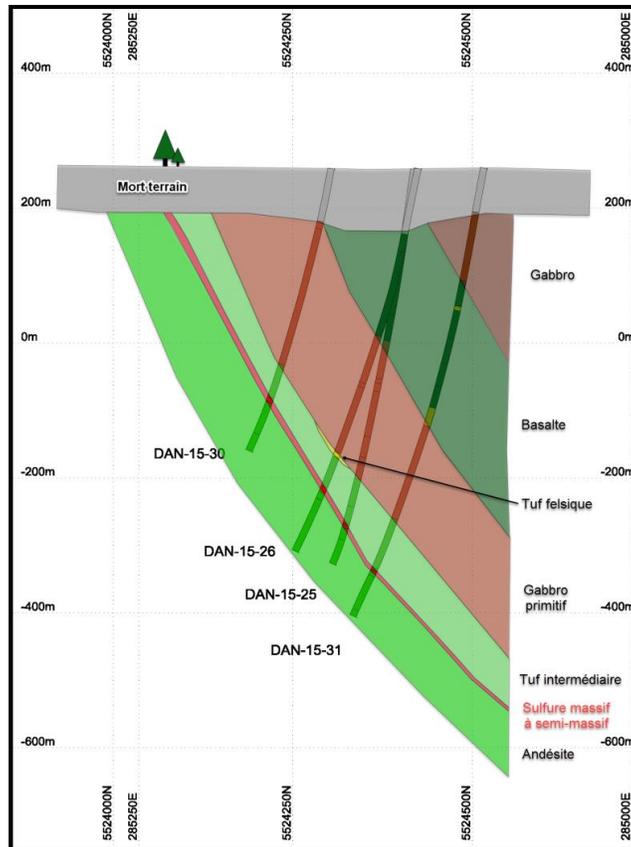


Figure 4. Coupe schématique du gîte Daniel 25 (tiré de Boucher et al., 2017).

Le gîte dans sa forme actuelle est fortement affecté par la déformation (photo 1). Par ailleurs, Boucher et al. (2017) observent que la sphalérite et la chalcopryrite se présentent sous la forme de veinules d'épaisseur millimétriques recoupant la pyrite massive, ce qui indiquerait leur caractère tardif. Ces veinules sont parallèles ou recoupent légèrement les laminations de pyrite. Enfin, un aspect très atypique du gîte Daniel 25, en référence au stéréotype gîtologique SMV, est l'absence de niveau exhalatif, ainsi que l'absence de cheminée d'altération.

Ces caractéristiques, associées à la disposition en veinules de la sphalérite et de la chalcopryrite ainsi qu'à un environnement fortement déformé, suggèrent que les phénomènes épigénétiques sont non-négligeables sur ce gîte.

Le gîte primaire, synvolcanique, formé durant la construction des arcs insulaires et des plateaux volcaniques a vraisemblablement subi une remobilisation (bonification ?) syntectonique durant la phase d'accrétion, associée au métamorphisme régional. Ce type de contexte métallogénique est encore relativement atypique en Abitibi. Certaines de ces caractéristiques se retrouvent au gîte B26, encaissé dans un horizon relativement similaire à l'horizon du gîte Daniel 25 à environ 70 km à l'O.

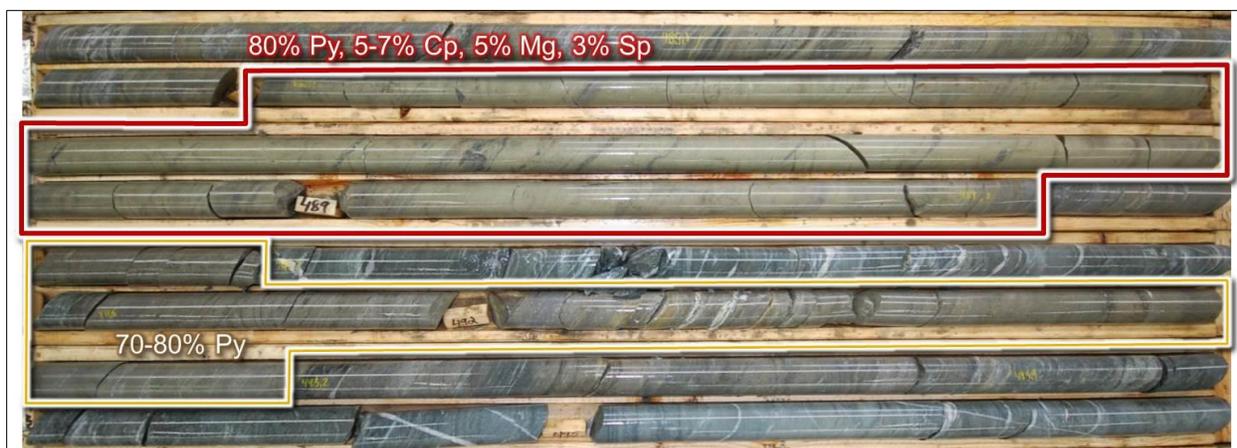


Photo 1. Lentille de sulfure massif intercepté par le forage DAN15-27. Les valeurs sont : 8,0 m @ 4,51 % Cu, 3,05 % Zn, 31,79 g/t Ag. (tiré de Boucher et al., 2017)

Outre le gîte Daniel 25, les deux indices suivants ont été découverts dans le même secteur (tiré de Boucher et al., 2017) :

Daniel-1

L'indice Daniel-1 se trouve à 3,5 km au nord-est de Daniel-25. La zone contient jusqu'à 0,230 g/t Au, 21,9 g/t Ag, 1,1 % Cu et une quantité négligeable de Zn sur une longueur carotte de 0,4 m. La zone est cisailée, bréchifiée et injectée de veines de quartz bréchiques contenant environ 4 à 5 % de chalcopryrite disséminée. La zone est encaissée dans un gabbro porphyrique légèrement magnétique (GM 59144). La minéralisation est intersectée dans le trou de forage DAN-01-06.

Daniel-1 Sud

L'indice Daniel-1 Sud se trouve à 2,8 km au sud-ouest de Daniel-1 et à 0,65 km au nord-est de Daniel-25. La zone contient jusqu'à 0,190 g/t Au, 6,6 g/t Ag, 1,0 % Cu et une quantité négligeable de Zn sur une longueur carotte de 0,95 m. La zone est présente dans un sulfure massif de pyrite qui est encaissé dans une unité de tufs felsiques à intermédiaires. La zone minéralisée est intersectée dans le forage DAN-00-03. L'épaisseur vraie calculée est de 0,88 m. Au moment de la rédaction de ce rapport, aucun calcul de ressource n'a été effectué sur le gîte Daniel 25.

2.1.1.4 Géologie quaternaire et topographie

Le gîte Daniel 25 est localisé dans un creux topographique du socle (Fig.5). Le secteur est couvert par une séquence très épaisse de sédiments glaciaires. L'épaisseur de cette séquence varie entre la soixantaine et la centaine de mètres. La surface du sol est au contraire extrêmement plane, l'altitude des colliers de forage est comprise entre 255 et 265 m. Un bon contrôle de la géologie quaternaire est offert par un levé de forages de mort terrain (type SONIC, Villeneuve et Fournier 2013) réalisé par la compagnie dans le but de détecter des anomalies de till. Un forage SONIC (MT12-23) réalisé sur le site du gîte Daniel 25 montre l'existence de deux niveaux de tills superposés : la partie inférieure est occupée par un diamicton à matrice dominante sableuse

d'une puissance d'une quinzaine de mètres et reposant directement sur le socle, tandis que la partie supérieure est composée d'un diamicton à matrice dominante fine épais d'une douzaine de mètres. Ces unités de tills sont intercalées de niveaux à blocs et d'horizons sableux fluvioglaciers d'épaisseur multimétrique formant des corps chenalisés. La couverture de till s'amincit très rapidement à quelques centaines de mètres au sud du gîte.

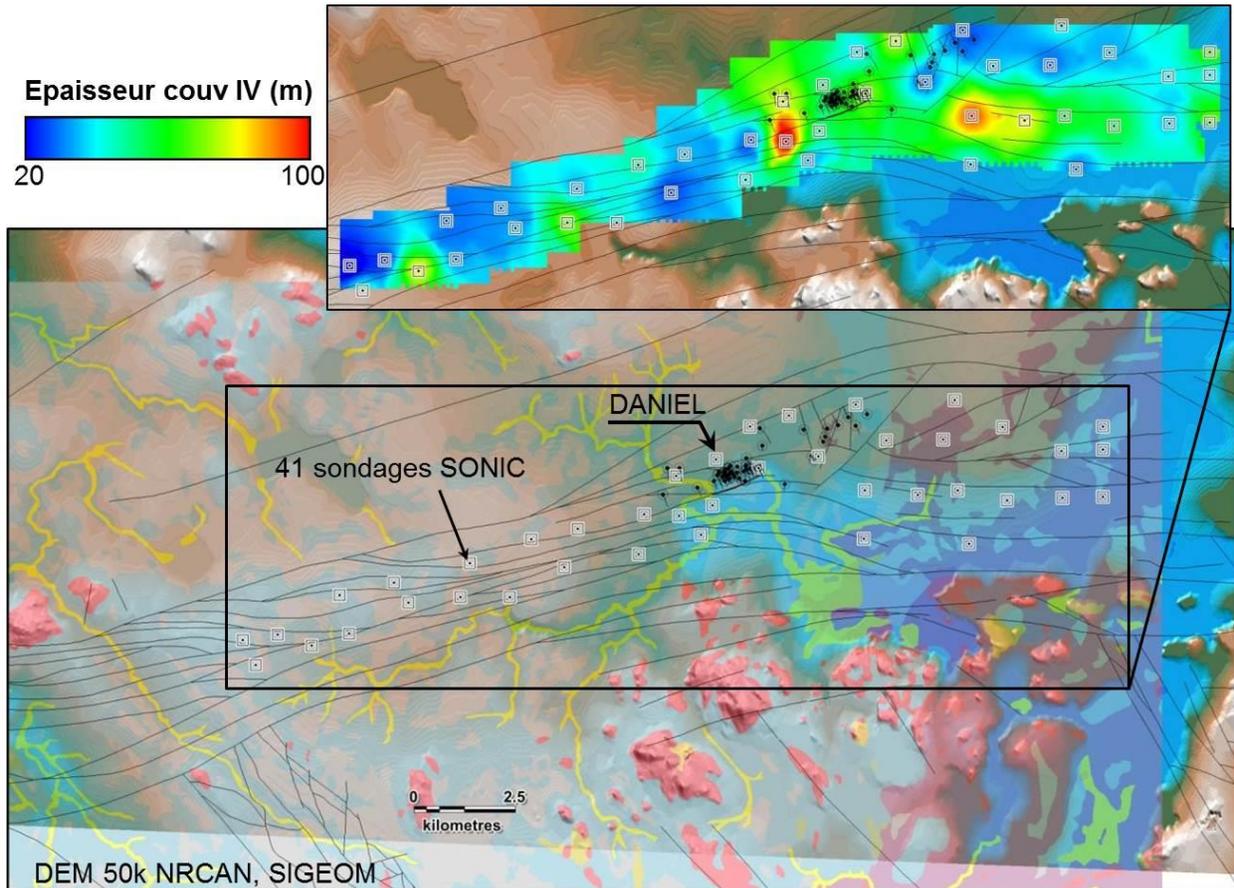


Figure 5. Topographie du site (DEM 50k NRCAN) superposée à la géologie quaternaire (Veillette et al., 2003). Couverture de forages de type SONIC. Les failles de socle ont été reportées (SIGEOM 2015).

2.2 Cadre hydrogéologique

2.2.1 Hydrostratigraphie

Des levés de piézométrie statique ont été effectués sur un grand nombre de forages du secteur Daniel 25 au cours du mois de juillet 2017 et du mois de septembre 2017. Tous les forages mesurés se sont avérés artésiens, autrement dit la surface piézométrique de l'aquifère profond est supérieure à la surface topographique. Le fait qu'en contrepartie, la zone ne soit pas inondée,

indique que l'aquifère profond est bel et bien « en charge », autrement dit qu'il s'agit d'un aquifère captif, non connecté avec l'aquifère libre superficiel formé par les sédiments glaciaires.

Sur le plan hydrostratigraphique, les niveaux de diamictons sableux ont le potentiel de constituer des aquifères épais et relativement continus, en connexion directe avec l'aquifère profond (socle fracturé). Les conditions captives de l'aquifère profond sont donc produites par l'unité de till fin reposant sur le till sableux. L'épaisseur de la couverture sédimentaire semble diminuer drastiquement vers le sud, et de manière plus progressive vers le nord, en raison d'une topographie du roc très irrégulière. L'information sur la continuité latérale des unités de till vers le nord et le sud n'est pas disponible étant donnée la localisation des forages SONIC. Toutefois, le forage SONIC MT12-22, localisé environ un kilomètre au nord de Daniel 25, ne présente aucune unité de till, mais au contraire un chenal fluvio-glaciaire très épais en contact direct avec le socle. Dans ces conditions, la recharge de l'aquifère captif devrait se produire par l'écoulement profond depuis les zones d'alimentation localisées en amont hydraulique, quelques kilomètres au nord, au-delà des limites du till à matrice fine assurant le confinement. Ultimement, l'amont hydraulique régional devrait coïncider grossièrement avec les zones d'affleurement du socle. La Figure 6 présente une estimation schématique des directions probables d'écoulement, d'après les observations présentées ici.

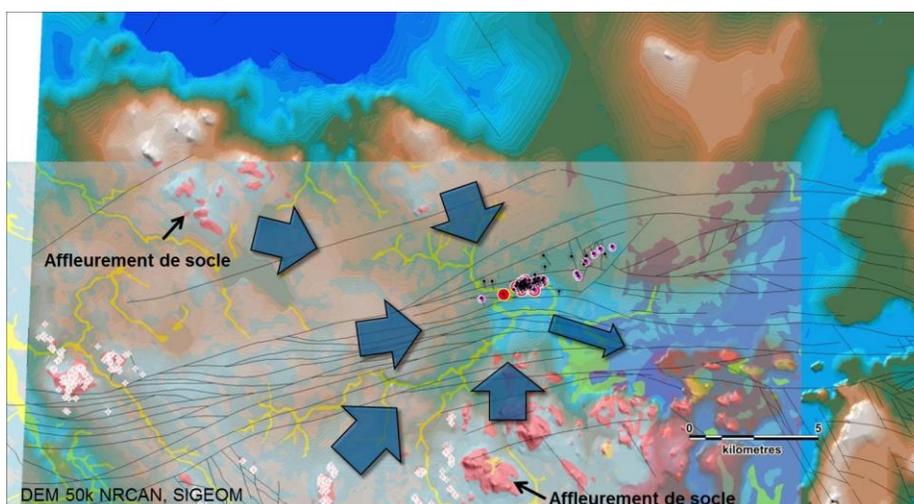


Figure 6. Directions probables d'écoulement souterrain depuis les zones de recharge (affleurement de socle, zones sans till à matrice fine) jusqu'au secteur d'étude. Topographie du site (DEM 50k NRCAN) superposée à la géologie quaternaire (Veillette et al., 2003).

3 MÉTHODE

Un volet important du mandat de ce projet était de développer un mode opératoire utilisable en exploration et adapté au contexte des terrains nordiques québécois. Dans cette optique, plusieurs intervalles d'échantillonnage ont fait l'objet de doublets de protocoles. Les sections suivantes présentent la problématique de l'échantillonnage.

L'échantillonnage passif consiste à échantillonner l'eau directement en profondeur dans les puits, à un intervalle donné, sans perturber le système hydraulique. Deux possibilités sont offertes : 1) descendre dans le puits un tube vide (*bailer*, planche photos A, annexe 1) aux extrémités duquel sont disposées deux billes permettant l'ouverture du tube pendant la descente et sa fermeture lors du mouvement de remontée ; 2) descendre dans le puits une tubulure très fine (1/4 pouce) et pomper à très faible débit afin de « cueillir » l'eau au regard d'une venue d'eau, sans générer de mouvements verticaux dans le puits (Puls et Barcelona, 1995, Creasey et Flegal, 1999, MDDEPQ, 2011).

Le système *bailer* est arrimé sur un treuil de 1000 m, fixé au toit du véhicule tout-terrain (ARGO), ce qui autorise des prélèvements très profonds, et une cadence moyenne de 5 par jour. Le volume du *bailer* est de 500 ml. Une tête protectrice a été installée à l'extrémité supérieure du *bailer* afin de limiter les frottements contre les parois des trous inclinés. En effet, lors du levé réalisé en 2016, il avait été remarqué que ces frottements avaient pour effet d'intégrer de grandes quantités de poussières dans le *bailer*, lesquelles se coinçaient dans les ouvertures et réduisaient l'étanchéité de manière critique. Les tests réalisés avec la tête protection lors du présent levé ont été tout à fait concluants sur le fait que ce problème est maintenant résolu.

L'échantillonnage à très faible débit (de l'ordre de 100 mL/min) s'opère au moyen d'une pompe de surface péristaltique connectée à une tubulure (planche photos B, annexe 1) dont l'extrémité inférieure est lestée afin de permettre sa descente dans le puits. La tubulure devra être purgée aussi en bas débit (moins d'une heure en général). La longueur de la tubulure constitue la limitation de profondeur pour ce mode opératoire. La mise en œuvre de ce mode opératoire est particulièrement complexe. En effet, la tubulure devrait idéalement être rendue solidaire du câble de lestage au moyen de rubans adhésifs fixés aux 3 ou 5 m, afin d'éviter l'entortillement, toutefois cela est impossible étant donné que les deux s'enroulent, lors de la remontée, sur deux enrouleurs différents. Enfin, ce mode opératoire n'a d'intérêt que si l'intervalle de prélèvement est situé au regard d'une entrée d'eau, ce qui requiert au préalable de pouvoir détecter les fractures ouvertes dans le socle au moyen de diagraphies de type imagerie optique ou acoustique (*televiwer*), ou profils de température (et éventuellement, conductivité, Eh, pH, oxygène dissous). Dans le cas présent, les fractures ont été détectées au moyen de profils de température, lorsque disponibles.

L'échantillonnage actif consiste à purger l'eau stagnante contenue dans le tubage avant de prélever l'eau de l'aquifère, en pompant à débit fort avec une pompe submersible classique (p. ex., la pompe Redi-Flo de Grundfos) (planche photos C, annexe 1).

Quel que soit le débit, la purge est régulée par une lecture en continu des paramètres physico-chimiques Eh, pH, température, conductivité et oxygène dissous de l'eau extraite. Après une période de fortes variations de ces paramètres, leur stabilisation est interprétée comme l'approvisionnement direct du pompage par l'eau de la nappe, de sorte que le prélèvement *sensu stricto* peut commencer. L'échantillonnage *passif au bailer* est communément utilisé par les études antérieures sur l'hydrogéochimie dans les contextes de minéralisation (*p. ex.*, Pauwels et al., 2002, De Caritat et al., 2009), tandis que l'échantillonnage *passif à faible débit* est la méthode par défaut des travaux environnementaux (Puls et Barcelona, 1995).

3.1 Protocole analytique

Le protocole d'échantillonnage utilisé est adapté du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques pour l'analyse des métaux ultratracés dans les eaux de surface (MDDELCC, 2014), lui-même inspirés en grande partie du guide de l'Agence américaine pour la Protection de l'Environnement (U.S. EPA, 1996). Ce protocole prévoit un rinçage du matériel à l'eau ultrapure entre chaque échantillonnage, ainsi que plusieurs précautions visant exclusivement à optimiser la réduction des contaminations. Toutes les manipulations de transvasement sont effectuées avec des gants et à l'intérieur de sacs protecteurs, et l'ensemble du matériel consommable (seringue, filtre, flacons, gants, serviettes) est changé à chaque échantillon. Il est à noter que les conditions d'échantillonnage dans des forages d'exploration, en isolement dans le bois, dans des zones souvent marécageuses, requièrent quelques adaptations du protocole théorique. Dans l'optique d'une « guerre au contaminant », l'une des priorités est de se créer un environnement abrité des intempéries, un « laboratoire roulant ». Dans le cas présent, la cabine de l'ARGO a été aménagée au moyen d'une table sur laquelle une serviette neuve est placée pour chaque échantillon (planche photo D). Les échantillons ont été envoyés par avion aux laboratoires accrédités d'ALS à Vancouver (excepté un lot qui a traversé le pays en camion suite à une erreur du transporteur) en quatre lots successifs. L'eau y a été analysée par ICP-MS de dernière génération avec cellule de collision (réduction des interférences). La résolution des analyses pour la plupart des éléments est la meilleure disponible aujourd'hui sur le marché canadien. La gamme d'éléments analysés est Al, Sb, Ag, As, Ba, Be, B, Bi, Cd, Ca, Cr, Co, Cu, Sn, Fe, Li, Mg, Mn, Mo, Ni, Pb, K, Se, Na, Si, Sr, Ti, V, Zn. Les limites de détection obtenues sont de 0,002 à 0,5 ppb ($\mu\text{g/l}$) selon les métaux. Les anions sont analysés par chromatographie ionique (Cl, Br, F, NO₃, NO₂, SO₄).

Enfin, les paramètres physico-chimiques pH, Eh, conductivité électrique (équivalent de la TDS *Total Dissolved Solids*) et alcalinité ont été mesurés sur le terrain (alcalinité par titration, le reste avec sonde) et au laboratoire.

3.2 QA-QC

Trois blancs de terrain ont été réalisés pendant le levé : au 6^e jour, au 14^e jour et au 16^e jour de la campagne. De plus, le plan d'assurance qualité et de contrôles qualité (QA/QC), interne au laboratoire ALS incluait 4 duplicatas, 6 blancs, et 18 standards. Les résultats de blancs de terrain et de laboratoire ainsi que des duplicatas de laboratoire sont présentés en annexe 5 de ce rapport.

Les blancs de terrain sont réalisés avec de l'eau désionisée, dont la concentration en éléments mineurs, traces et ultratrace n'est pas nulle en pratique. Il est détecté des concentrations en ultratrace, traces et même certains mineurs, qui ne sont pas négligeables au regard de la valeur médiane obtenue pour le levé. Il s'agit vraisemblablement davantage de la mauvaise qualité du blanc que de contamination puisqu'aucune concentration significative n'est reportée pour les éléments majeurs.

Les blancs de laboratoire subissent le même problème pour plusieurs éléments ultratrace (Au, Tl, Ag, Be, Cd, Te, Ce, Y), ainsi que pour Sn, Sb, Cu, Al. Dans l'ensemble, ces résultats demeurent très satisfaisants en ce qui concerne la surveillance des contaminations aussi bien sur le terrain qu'au laboratoire.

L'analyse des duplicatas fait apparaître une précision très satisfaisante pour la plupart des éléments d'intérêt. Toutefois, une imprécision dépassant 30 % pour V, Cd, U, Al, Cu, Sb, Sn, et plusieurs éléments de moindre importance a été noté dans le cadre cette étude. Les valeurs d'écart relatif sont comparées à la variable n_cat qui est le nombre de catégories obtenues, autrement dit le nombre de valeurs différentes obtenues sur le lot des 83 échantillons du levé. Cette variable nous informe sur la résolution des analyses, laquelle diminue drastiquement lorsque les valeurs mesurées se rapprochent de la limite de détection. Il est nécessaire d'analyser les problèmes de précision au regard de la résolution du signal, puisqu'il est tout à fait attendu que la précision diminue de manière inversement proportionnelle à la résolution, autrement dit au nombre de catégories. Vu de cette manière, les problèmes de précision détectés sont tout à fait normaux pour la plupart des éléments, puisqu'ils sont directement liés à des valeurs très faibles du nombre de catégories (n_cat). Toutefois, un certain nombre d'éléments échappant à cette règle : In, U, Cr. Dans ces cas, il est plausible que les problèmes de précision soient reliés à des interférences analytiques.

3.3 Stratégie d'échantillonnage

Au total 83 échantillons d'eau ont été prélevés durant cette campagne, incluant 3 échantillons blancs. La distribution des échantillons par catégories est présentée sur le tableau 1. Celle-ci reflète les principaux objectifs du levé : 17 échantillons sont consacrés à documenter avec précision le bagage d'éléments associé à l'empreinte du SM aux différentes profondeurs. Les échantillons du groupe « contact » sont prélevés au regard du SM, c.-à-d., à la profondeur où le forage recoupe le SM. D'autre part, l'effet de la dispersion sur l'empreinte hydrogéochimique est contraint pas les échantillons du groupe « proximal » (0 – 300 m du SM) puis du groupe « distal »

(> 300 m du SM). Par ailleurs, la majorité des forages du groupe « proximal » ont été échantillonnés à plusieurs profondeurs : un échantillon est pris à la profondeur correspondante à la projection horizontale du SM suivant la plus courte distance, puis 2 à 3 échantillons à d'autres profondeurs à des intervalles de 100 à 150 m.

Ces échantillonnages multiniveaux visent 1) à contraindre de façon rigoureuse l'effet de la profondeur sur la chimie de l'eau, incluant aussi bien les effets se produisant dans l'aquifère sensu stricto que ceux reliés aux mélanges d'eau par diffusion (par gradient de densité entre des eaux pénétrant le puits à différentes profondeurs) ou par advection (gradient de pression entre des eaux pénétrant le puits à différentes profondeurs) verticale à l'intérieur du puits ; 2) contraindre l'effet d'un écart de profondeur entre l'échantillon et la lentille localisée dans l'environnement du puits (test aveugle en contexte d'exploration) ; 3) contraindre l'effet d'un écart vertical vis-à-vis d'une venue d'eau (évaluer la nécessité de caractériser les venues d'eau dans le puits).

Ceci porte à 66 le nombre d'échantillons dédiés à l'analyse de l'empreinte hydrogéochimique du corps métallifère. Par ailleurs, 17 échantillons sont consacrés au développement opératoire de la méthode, dont 10 aux tests de mode opératoire (échantillonnage passif *bailer*, passif faible débit, ou actif fort débit, voir section ci-dessus), et 7 à l'optimisation du mode d'extraction. Pour ce dernier aspect, 4 échantillons sont des tests d'extraction, c.-à-d., des échantillons dédiés à vérifier l'impact du temps de manipulation entre l'extraction et la fermeture du flacon temps durant lequel il se produit des équilibrages avec le CO₂ atmosphérique qui induisent des modifications drastiques de Eh, pH et de conductivité qui ont au départ été régulées. Ces tests d'extraction consistent à échantillonner deux fois l'eau extraite d'un même *bailer*, à deux temps différents (p. ex., 3 min et 6 min). Les 3 échantillons blancs, quant à eux, visent à vérifier que les précautions rigoureuses prises pour réduire les contaminations lors de l'échantillonnage (voir section précédente) sont satisfaisantes.

Tableau 1 : Stratégie d'échantillonnage de l'eau autour de la lentille de sulfure massif.

Profondeur forage (m)	Bailer			Développement opératoire				Total
	Empreinte contact	Halo proximal	Halo distal / témoins	Triplets mode opératoire	Doublets mode opératoire	Test extraction	Blancs	
30 – 150 m	1		12	4	1			18
150 – 350 m	4	5	9					18
350 – 550 m	4	4	4		1			13
550 – 700 m	7	14	1					22
965 m	1							1
Total n ech	17	23	26	8	2	4	3	83

4 CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE

L'analyse des éléments majeurs permet de documenter les types d'eau en présence et les différents facteurs affectant la géochimie de l'eau du socle en profondeur. En particulier, le diagramme Cl-Br et le diagramme classique de Piper présentés ci-dessous.

Le diagramme Cl-Br présenté à la figure 7 met en évidence l'excellente qualité des données. Pratiquement tous les points s'alignent parfaitement, à l'exception de l'échantillon #5, pour lequel les concentrations étaient sous la limite de détection. Le ratio Cl/Br permet de distinguer les saumures d'origine marine et continentale. Le ratio de l'eau de mer est de 280, il demeure constant lors de la dilution des saumures marines par des eaux de recharge (droite Cl/Br = 280 à la figure 7). En contexte de salinisation continentale, ce ratio est compris entre 60 et 100 (Stober et Bucher, 1999). Dans le cas présent, le ratio Cl/Br est approximativement égal à 60, ce qui indique la présence d'un seul type d'eau *sensu stricto*, suivant une droite de salinisation continentale (donc, de deux pôles, un pôle de type « eau de recharge » et un pôle de type « eau mature »). Cette conclusion est consolidée par l'excellente corrélation entre les valeurs en Cl et Br et la profondeur de l'échantillon : Cl et Br sont des éléments de très grande solubilité, de sorte que leur concentration dans l'eau ne fait qu'augmenter lors des réactions eau-roche, à mesure que l'eau devient plus mature. Il est donc cohérent que les plus fortes concentrations soient trouvées en profondeur, où le temps de résidence de l'eau est théoriquement le plus grand.

Cependant, cette relation entre la profondeur de l'eau et le temps de résidence n'est pas parfaite dans les contextes d'aquifère de socle, étant donnée l'hétérogénéité des propriétés hydrauliques du milieu. Les chemins d'écoulement sont multiples, complexes et extrêmement ségrégués, de sorte que deux gouttes d'eau voisines peuvent avoir suivi deux chemins très différents, donc des temps de résidence différents. Ces aspects sont développés plus bas dans ce texte.

Dans le cas présent, les flagrants écarts à la cette relation entre la maturité de l'eau (indiquée par les valeurs en Cl et Br) et son élévation sont clairement reliées à des problèmes d'étanchéité du *bailer* lors de l'échantillonnage. Il s'agit des échantillons numérotés à la figure 7. Les notes de terrain ont permis d'évaluer la sensibilité de l'échantillonnage *bailer* aux divers aléas du terrain, soit :

#1 : blocage du *bailer* en première passe, déblocage au « *dummy* », prélèvement en deuxième passe, probable défaut d'étanchéité causé par la présence de poussière ;

#2 et 3 : Problème probable d'étanchéité du *bailer* (limaille de fer, remonté manuelle, car panne du treuil mécanique) ;

#4 : Allers-retours du *bailer* lors du prélèvement, probable défaut d'étanchéité (poussières).

En conclusion, la manipulation du *bailer* est très sensible. Il s'une étape critique pour l'obtention de résultats de qualité qui peut toutefois être évaluée *a posteriori*, à l'étape du traitement comme nous l'avons montré ici.

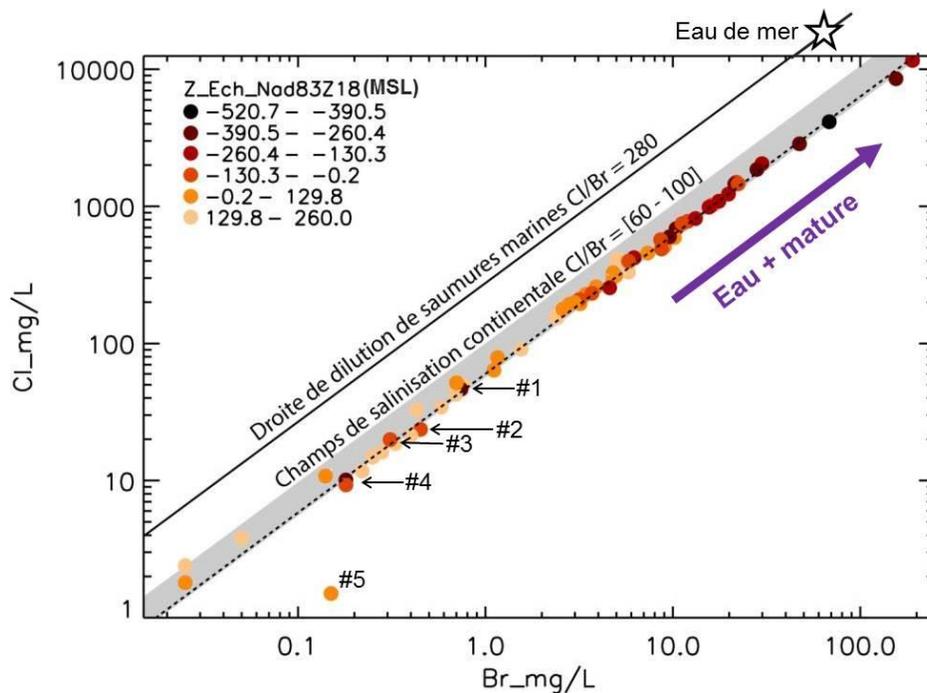


Figure 7. Diagramme Cl versus Br pour l'ensemble des échantillons prélevés au *bailer*.

La couleur des symboles indique l'élévation de l'échantillon par rapport au niveau moyen de la mer ($Z_{Ech_Nad83Z18}$; MSL : *Mean Sea Level*). Les droites de dilution de l'eau de mer et de salinisation continentale sont indiquées à titre de repère. Les étiquettes numérotées sont expliquées dans le texte.

La caractérisation des eaux du socle par la projection des valeurs en cations et anions majeurs sur le diagramme de classification de Piper (figure 8) confirme les conclusions faites ci-dessus, et montre très clairement une évolution depuis un terme d'eau très peu saline (TDS faible, pôle 1 de la Fig. 8), de type $HCO_3^- - Ca - Mg$, vers des eaux plus salines (TDS moyenne, pôle 2 de la Fig. 8) de type $SO_4^{2-} - Cl - Ca$, puis un pôle d'eau mature très saline (TDS forte, pôle 3 de la Fig. 8) de type $Cl - Ca$. Ce type d'évolution a déjà été décrit par Gascoyne (2004) comme étant caractéristique d'une chimie contrôlée par la salinisation continentale dans des roches magmatiques intermédiaires du Bouclier canadien.

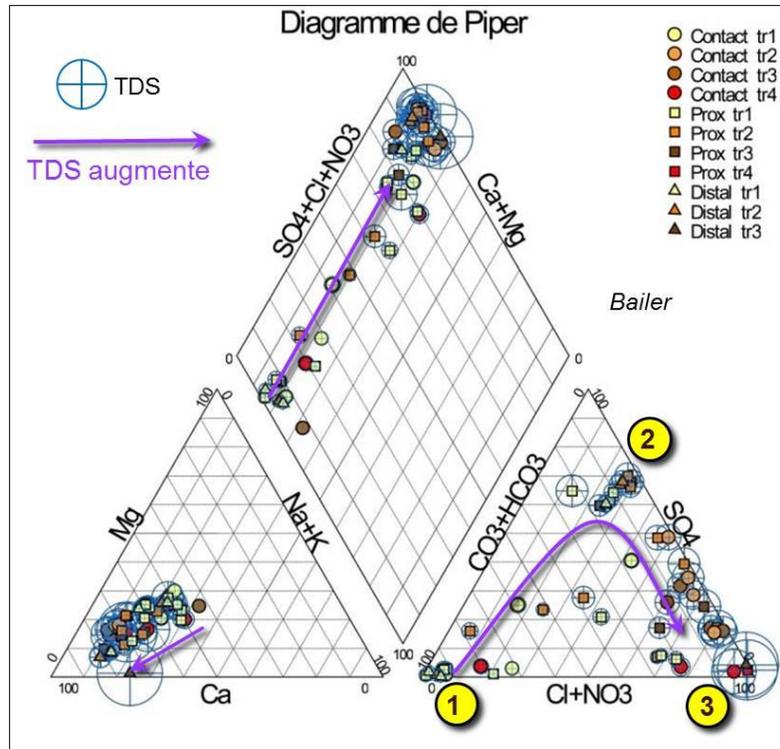


Figure 8. Composition de l'eau en cations et anions majeurs. TDS : *total dissolved solids*.

Les labels font référence aux groupes d'échantillons décrits dans le texte.

Dans la suite de ce document, les échantillons seront répartis en 4 tranches d'élévation verticale, décrites dans le tableau 2.

Tableau 2. Tranches d'élévation verticale des échantillons en mètres par rapport au niveau marin moyen (*Mean Sea Level, MSL*).

Z_UTM (MSL)	De	A
Tranche1	44.0	232.3
Tranche2	-144.2	44.0
Tranche3	-332.4	-144.2
Tranche4	-520.7	-332.4

(Pour référence, la surface topographique sur le site de l'étude est relativement constante à 260 m d'altitude.)

5.1 Détermination des niveaux de base

La caractérisation satisfaisante du niveau de base est une condition *sine qua non* préalable à tout effort d'identification de valeurs dites « anormales ». Dans cette optique, deux approches sont considérées ici : l'analyse des niveaux de base d'après des bases de données (BD) régionales dans des milieux rocheux ignés plus ou moins analogues au terrain étudié, puis l'analyse des niveaux de base locaux, autrement dit la reconnaissance des échantillons du groupe DISTAL se comportant comme de « bons témoins ». Les BD régionales sont une source précieuse d'information, toutefois elles sont confrontées à plusieurs limitations : seule la partie superficielle de l'aquifère de socle est échantillonnée, le protocole d'échantillonnage est dans certains cas hétéroclite et mal renseigné, enfin, les protocoles analytiques sont de faible résolution ce qui est critique pour la plupart des éléments mineurs, et pour l'ensemble des éléments traces et ultratrace.

5.1.1 Bases de données régionales

Trois levés régionaux sont considérés, tous trois acquis à l'occasion des programmes PACES (Programme d'Acquisition des Connaissances sur les Eaux Souterraines) réalisés par les universités québécoises au cours des 10 dernières années :

- La BD de l'UQAT (PACES-UQAT) couvre la portion sud de l'Abitibi, soit des territoires municipalisés. Cette BD est d'intérêt particulier pour la présente étude puisque le contexte géologique est très semblable à celui de Daniel 25. Elle contient 489 analyses d'eau souterraine. Les protocoles d'échantillonnage sont toutefois très variables et les analyses ne sont pas à haute résolution.
- La BD de l'UQAC (PACES-SLSJ) couvre les territoires municipalisés de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et comporte 284 échantillons d'eau souterraine avec des protocoles homogènes. Toutefois, les analyses ne sont pas à haute résolution.
- La BD de l'UQAC (PACES-CHCN) couvre les territoires municipalisés de Charlevoix et de la Haute-Côte-Nord et comporte 106 échantillons d'eau souterraine avec des protocoles homogènes. Les analyses ne sont pas à haute résolution.

Dans la présente étude, seul le niveau de base en Zn a été analysé avec précision à partir de ces trois bases de données, et comparé avec les échantillons du groupe DISTAL du levé de Daniel 25.

Une analyse de la variabilité des niveaux de base en Zn dans l'eau souterraine, selon la lithologie des terrains, est présentée à la figure 9. Il n'apparaît aucune variation sensible : le niveau de base zincifère dans l'eau est relativement stable autour de 5 ppb en médiane, peut-être légèrement

plus bas dans les roches ultramafiques. En comparaison, les échantillons du groupe DISTAL du levé de Daniel 25 ont une médiane en Zn de 15 ppb, ce qui est nettement plus élevé. Le seuil d'anomalie (96^e centile) est extrêmement élevé aussi à 548 ppb, en comparaison au 55 – 63 ppb de la BD PACES-UQAT (volcanites). Cela indique que certains échantillons du groupe DISTAL du levé de Daniel 25 sont situés dans le halo d'une minéralisation zincifère et ne sont donc pas utilisables comme des témoins.

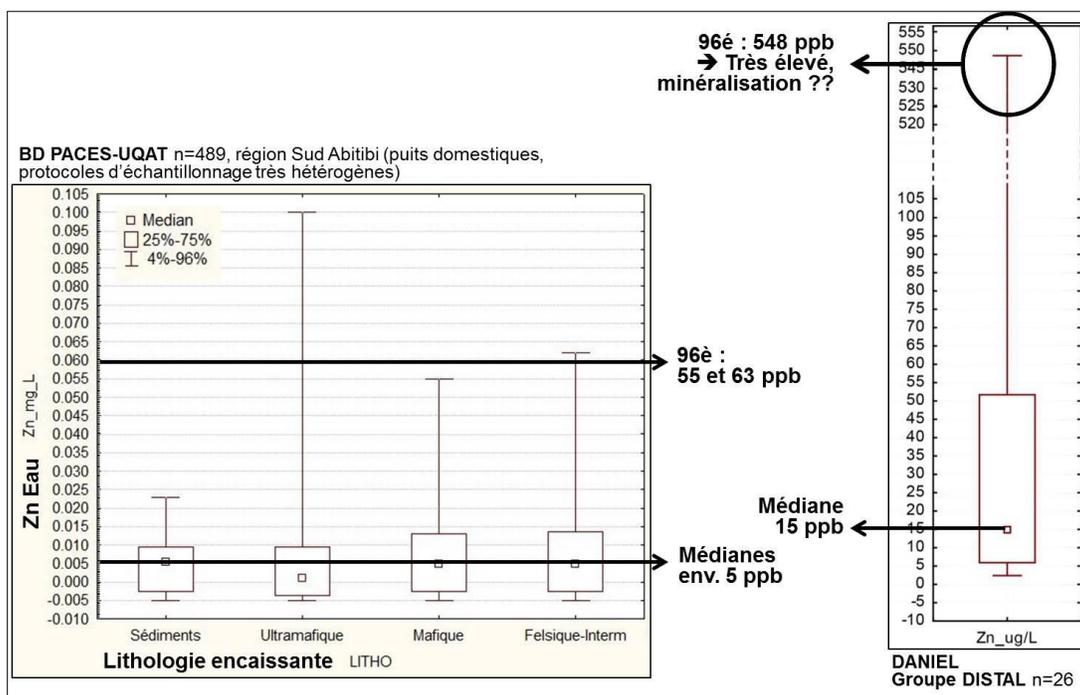


Figure 9. Influence de la lithologie de l'aquifère sur le niveau de base Zn dans l'eau (BD PACES-UQAT), et comparaison avec le groupe DISTAL du levé Daniel 25.

Un tri a donc été réalisé afin de distinguer les « bons témoins » des « mauvais témoins ». Ce tri est détaillé dans la section suivante. Huit échantillons, répartis dans trois forages, ont été retenus comme des bons témoins, c.-à-d., non influencés par des sulfures massifs zincifères et permettant donc de définir les niveaux de base de bonne qualité. Parmi ces huit échantillons, un est dans la tranche 3 de profondeur (voir tableau 2), trois sont dans la tranche 2, et quatre dans la tranche 1. Il y a donc un certain défaut de caractérisation des niveaux de base à très forte profondeur (tranches 3 et 4), relié au fait que les forages distaux, n'interceptant pas de minéralisation, n'ont pas été poursuivis en profondeur.

La figure 10 compare les distributions en Zn entre les trois BD régionales ainsi que les *bons témoins* du levé de Daniel 25. Ces données démontrent que le niveau de base en Zn dans l'eau souterraine des aquifères de roc est d'une grande stabilité, les valeurs médianes évoluant entre 3 et 10 ppb, tandis que les premiers quartiles sont entre 3 et 4 ppb, et les 3^e quartiles entre 9 et

21 ppb. Cette grande stabilité est exprimée aussi par les très faibles valeurs des écarts-types relatifs, qui sont de 1,88 et 1,07 pour les BD de PACES-SLSJ et PACES-CHCN respectivement, et de 4,93 pour la BD PACES-UQAT.

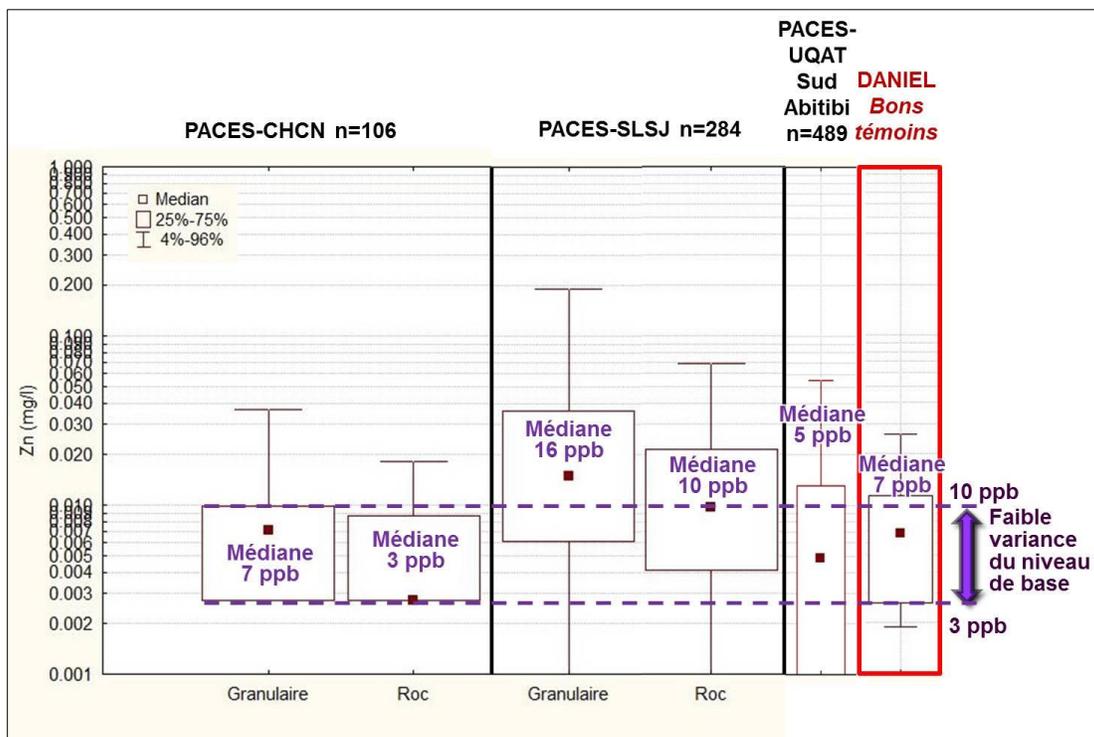


Figure 10. Statistiques de base des valeurs de Zn dans les trois BD hydrogéochimiques régionales, en comparaison aux 8 bons témoins du levé de Daniel 25.

Pour finir, cette figure illustre le fait que les bons témoins retenus pour le levé Daniel 25 présentent une variabilité tout à fait analogue à celle des niveaux de base indiqués par les BD régionales. Cela confirme que ces échantillons peuvent être traités comme de bons témoins dans la suite de l'étude.

5.1.2 Niveau de base local : bons témoins et cibles potentielles

Cette section développe le tri effectué sur le groupe DISTAL afin de déterminer les bons et mauvais témoins, ces derniers étant, dans certains cas, *a contrario* de bonnes cibles. Ce tri est basé sur les critères suivants : 1) Zn dans la tranche [0-200 m] doit être inférieur à 10 ppb, et inférieur à 25 ppb dans les tranches profondes ; 2) aucun dosage (c.-à-d., valeur mesurée dans la carotte) dans le forage ne doit dépasser 0,1 % Zn. Il s'agit d'une approche plutôt conservatrice.

La figure 11 montre une vision en plan des forages retenus comme bons témoins ainsi que les détails (valeur de Zn dans l'eau à différentes profondeurs, valeur des dosages le cas échéant) de ceux considérés au contraire comme des mauvais témoins.

Étant donné le caractère très stable du signal zincifère dans l'eau, toute valeur anormale est à considérer comme une cible potentielle. Une très forte concentration en Zn dans l'eau ne peut être que l'expression d'une source zincifère dans l'environnement rocheux. En effet, les facteurs dits « secondaires » affectant le niveau de base zincifère tel que Eh, pH etc. génèrent des variations d'une amplitude sans commune mesure avec l'enrichissement se produisant dans le panache d'un sulfure massif zincifère. En particulier, les trois forages localisés le plus à l'ouest du levé montrent un enrichissement en Zn très marqué et spatialement très cohérent. Ces échantillons, évidemment de mauvais témoins, sont *de facto* d'excellentes cibles. En effet, ce signal est interprété ici comme l'émanation d'un corps zincifère localisé probablement quelques dizaines à centaines de mètres vers l'ONO du forage le plus anormal (DAN14-18, voir carte de localisation des forages en annexe 6).

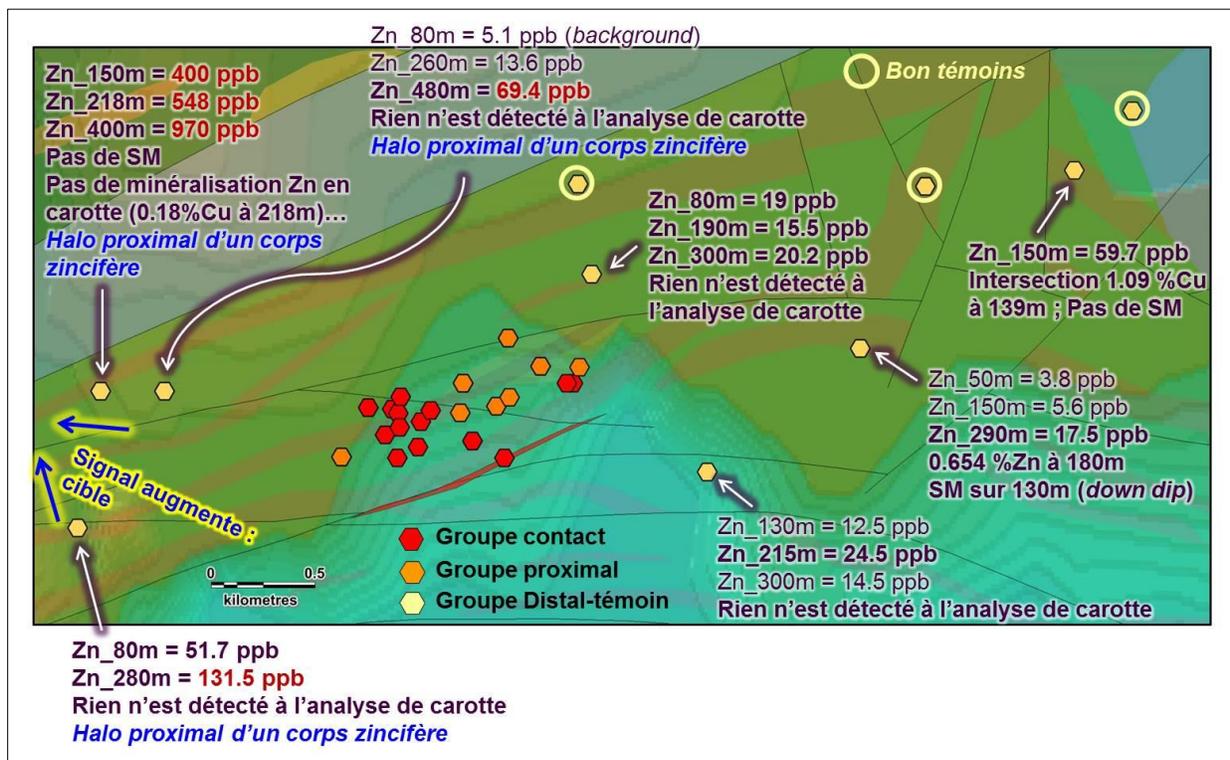


Figure 11. Localisation des 3 groupes de forages : CONTACT, PROXIMAL, DISTAL.

Groupe DISTAL : distribution des bons témoins et des mauvais témoins. Les détails des valeurs sont indiqués sur les mauvais témoins, dont certains sont en revanche de « bonnes cibles » (voir texte). Fonds topographique (DEM 50k NRCAN) et géologique (SIGEOM 2015).

5.2 Halo hydrogéochimique

5.2.1 Résultats bruts Zn, Cu

Les figures 12 et 13 présentent les résultats du levé pour Zn et Cu. Le Zn a un enrichissement très marqué dans tous les échantillons du groupe CONTACT (couleur rouge, Fig. 12 et Fig.13). Pour ce groupe, la majorité des valeurs sont supérieures à 1000 ppb, avec un point culminant à 2480 ppb soit un facteur d'enrichissement (FE) de près de 500 fois le niveau de base de 5 ppb. Le halo proximal est détecté par les échantillons du groupe PROXIMAL (couleur orange, Fig. 12 et Fig.13). Les statistiques des valeurs obtenues pour les différents groupes sont détaillées dans la section suivante. Les courbes noires illustrent de manière informelle le pendage de la lentille de SM, dont l'intersection avec la subsurface (sommets du socle rocheux) correspond approximativement à la forme dessinée en rouge. Les valeurs les plus élevées en Zn semblent correspondre aux échantillons en contact profond avec le SM.

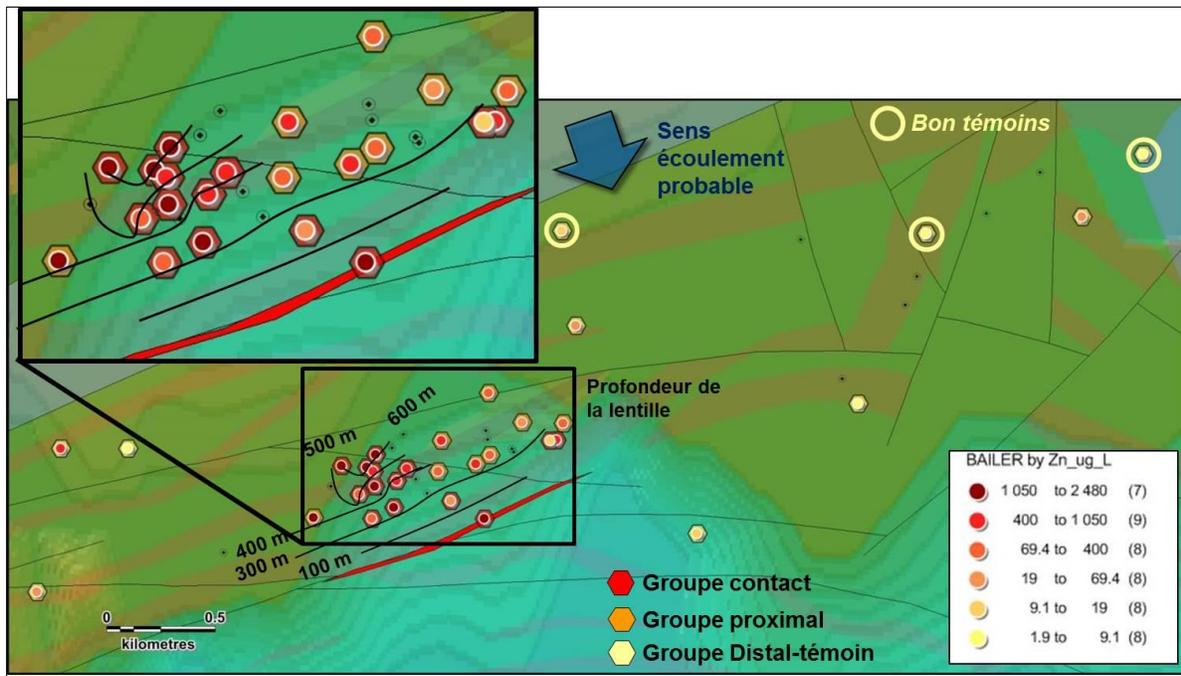


Figure 12. Concentration en Zn dans l'eau souterraine autour de la lentille zincifère de Daniel25.

Les forages sont classés par groupe selon la proximité de la lentille. Fonds topographique (DEM 50k NRCAN) et géologique (SIGEOM 2015).

Les résultats bruts pour Cu sont présentés à la figure 13. Dans ce cas les échantillons ne suivent pas la même logique de groupement puisque les zones cuprifères du gîte Daniel 25 ne coïncident pas parfaitement avec les zones zincifères. Les intersections les plus minéralisées en Cu d'après l'analyse des carottes (essais) sont indiquées sur la Fig. 13 en gris et noir. L'enrichissement en

Cu dans l'eau se corrèle très bien avec les zones cuprifères pour les échantillons les moins profonds. La correspondance est excellente. En revanche, en profondeur, le SM ne semble pas générer d'empreinte cuprifère dans l'eau, puisque, dans 3 des 4 cas d'intersections à plus de 500 m de profondeur, l'eau n'est pas enrichie en Cu tandis que la roche est > 1 % Cu. Ce comportement du Cu sera décrit plus en détail dans les sections suivantes.

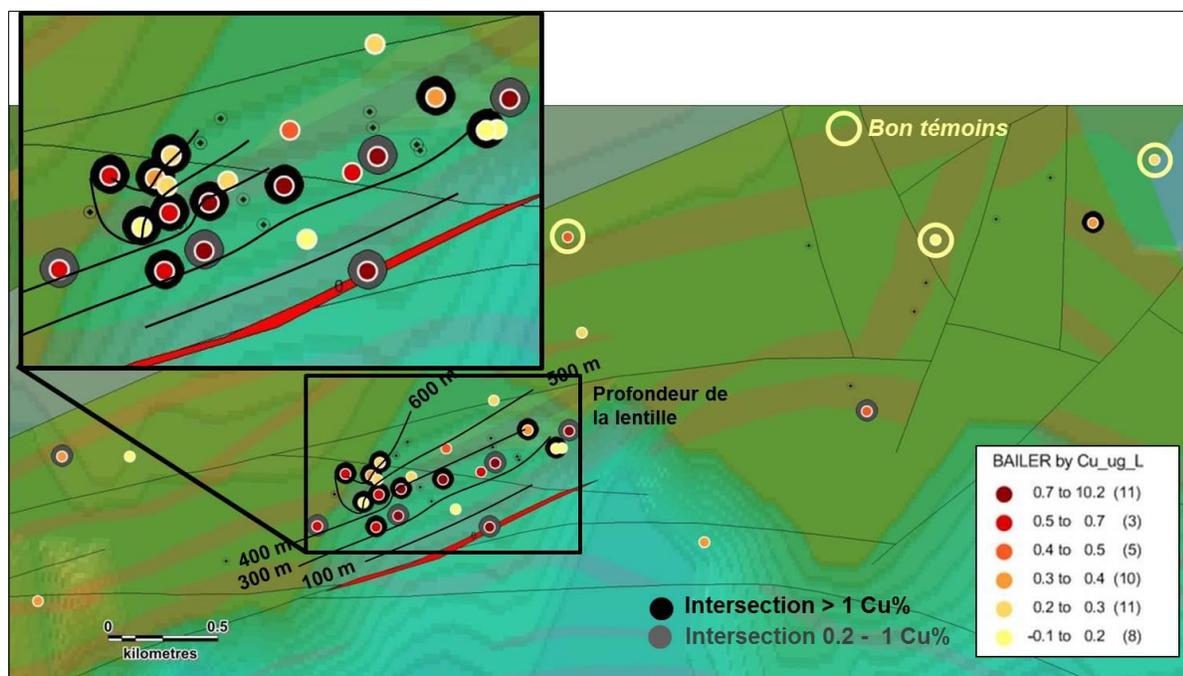


Figure 13. Concentration en Cu dans l'eau souterraine autour de la lentille zincifère de Daniel25.

Les forages sont classés par groupe selon la proximité de la lentille. Fonds topographique (DEM 50k NRCAN) et géologique (SIGEOM 2015).

5.2.2 Cartographie du panache zincifère

Une projection reconstituée du halo zincifère dans l'eau souterraine entre 280 et 430 m de profondeur verticale est présentée à la figure 14. Il apparaît que ce halo est très anisotrope, avec une extension dans la direction E-O dépassant 600 m pour le contour 70 ppb (env. 97^e centile du signal régional) tandis qu'elle est, par endroits, inférieure à 200 m dans la direction orthogonale. Cet allongement du halo coïncide avec la direction de fracturation ouverte établie d'après l'analyse tridimensionnelle des profils de température (cf. annexe 2).

D'autre part, une distinction entre deux différents halos suggère très fortement la présence de deux sources différentes. Le premier est le halo du gîte Daniel 25, très bien circonscrit pour sa partie nord et le deuxième halo est localisé à l'extrême ouest du secteur intercepté par 3 forages à différentes profondeurs. Ce deuxième (?)halo est détecté sur la Fig. 14 par deux échantillons extrêmement enrichis en Zn, dans le forage localisé le plus à l'ouest (DAN14-18, voir carte de localisation des forages en annexe 6). Le FE suggère ici que la source zincifère, autrement dit le

corps métallifère dont émane ce panache, est très proximale, vraisemblablement moins de 200 m par analogie avec le panache de Daniel 25.

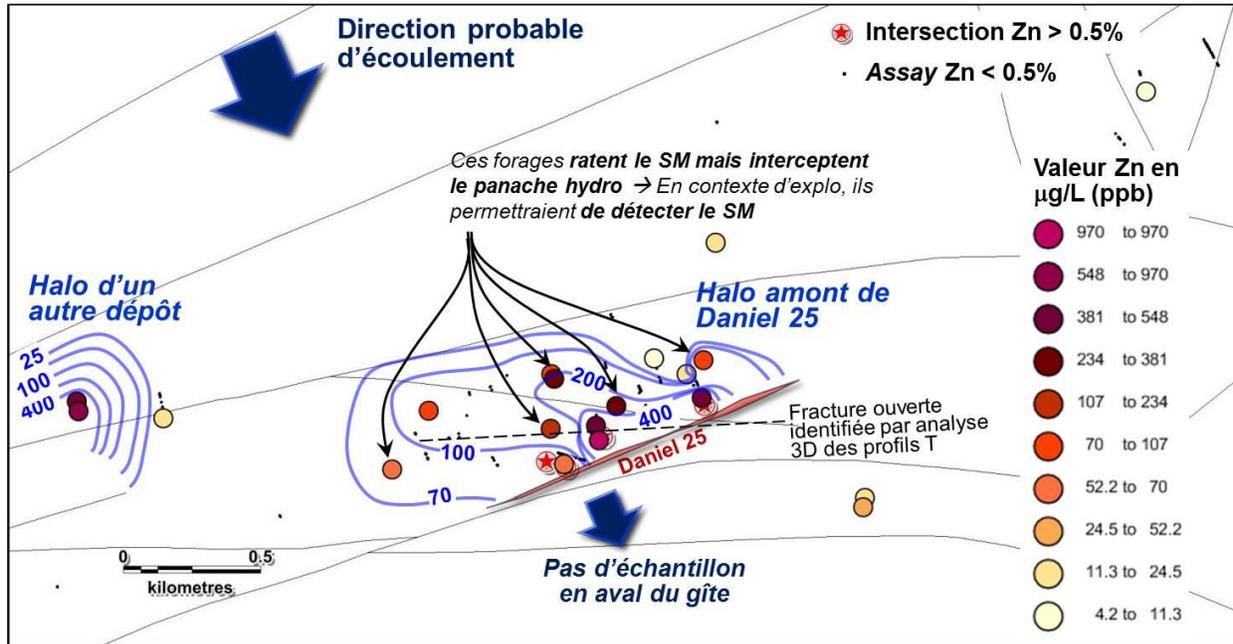


Figure 14. Reconstitution du panache zincifère dans l'eau souterraine en amont du corps métallifère de Daniel25, entre 280 et 430 m de profondeur verticale. Analyse des fractures ouvertes par les profils de température : voir annexe 2.

L'extension totale des halos Zn et Cu serait de 2 km environ en subsurface (Fig. 15). Ces valeurs sont des minimas puisque les niveaux de base considérés sont très conservateurs. Toutefois, il s'agit d'estimations très larges étant donné le peu de points disponibles pour tracer les courbes de décroissance. Fait intéressant, il semble qu'en profondeur le halo Zn soit plus riche, mais moins diffus.

Plusieurs échantillons du groupe PROXIMAL interceptent le halo zincifère, tandis qu'aucune anomalie métallique n'est visible à l'analyse de roche ce qui permet, en contexte d'exploration, de suspecter fortement la présence d'un gîte à proximité (échantillons indiqués par des flèches à la figure 14).

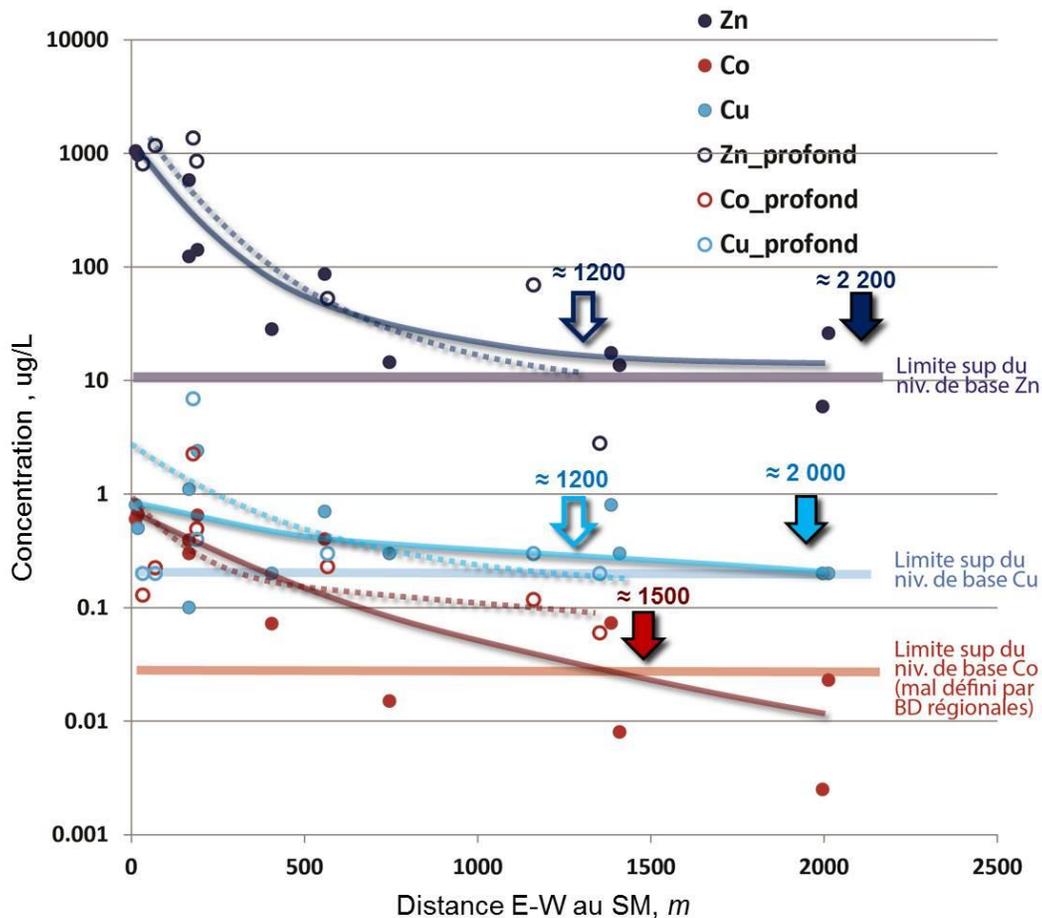


Figure 15. Profils de distance des panaches Zn, Cu et Co.

À la figure 14, seule la partie nord du halo est échantillonnée, étant donnée l'absence de forage au sud du gîte Daniel 25. La direction probable de l'écoulement souterrain dirigée vers le SSE est déduite des données de géologie quaternaire : position approximative des zones de recharge de la nappe profonde correspondant aux limites des unités imperméables la confinant. D'après cette direction d'écoulement, tous les échantillons seraient donc localisés en amont hydraulique du gîte Daniel 25. Toutefois, la géométrie du réseau de fractures peut produire des écoulements transversaux, dans la direction E-O, compatibles avec un gradient régional dirigé globalement vers le SSE. Quoi qu'il en soit, ces informations suggèrent que le levé intercepte essentiellement le « dos » du panache, et que son extension serait probablement plus importante vers le sud, tel qu'illustré de manière purement schématisée à la Fig. 16.

Le transport des éléments dans l'eau s'opère par deux différents mécanismes : l'advection et la diffusion. L'advection implique un mouvement des molécules d'eau *sensu stricto*, il s'agit de l'écoulement souterrain, tandis que le transport par diffusion chimique est le résultat de l'agitation moléculaire et se produit sur des distances typiquement plus faibles. À l'heure actuelle, aucune estimation de ces distances dans le milieu fracturé n'est disponible, toutefois ce type de problème

pourrait être abordé en modélisation numérique d'écoulement. Il est donc probable que le halo détecté par le présent levé soit, de manière dominante, un halo transporté par diffusion.

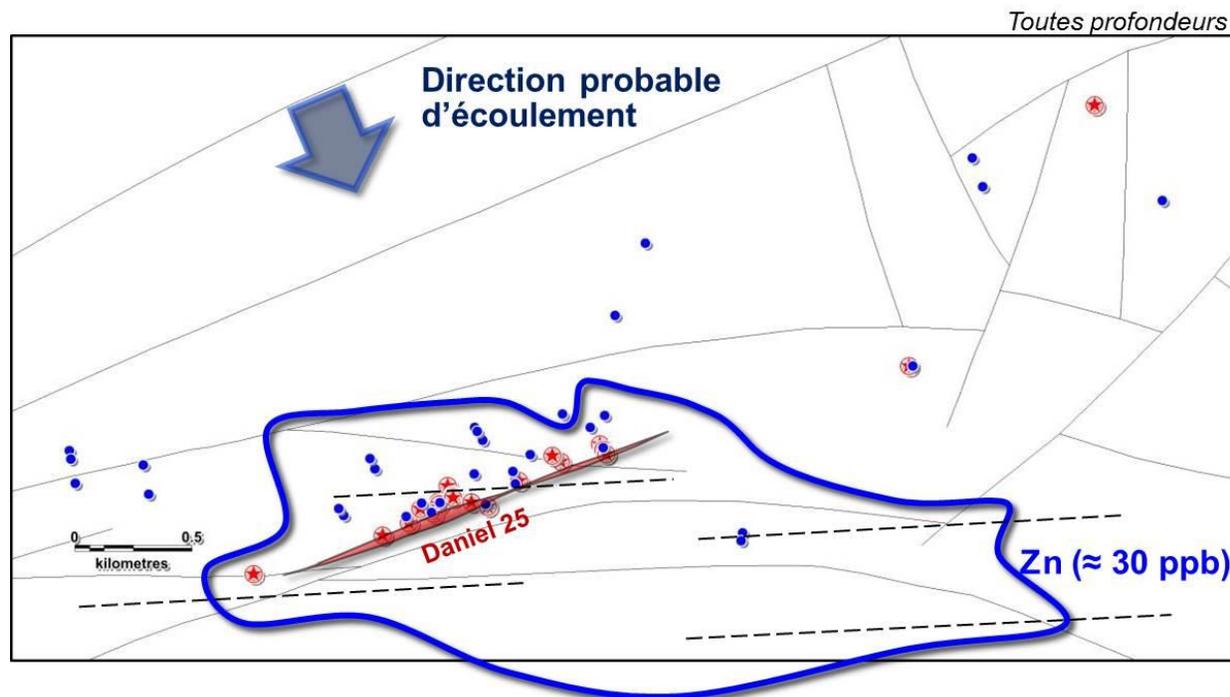


Figure 16. Vision schématique (et spéculative pour la portion aval) de la forme et de l'extension probable du panache zincifère dans l'eau souterraine émanant du corps métallifère de Daniel 25 (contour 30 ppb).

Les fractures ouvertes sont indiquées de manière schématique afin d'illustrer leur impact sur la diffusion du panache. Leur orientation est suggérée par l'analyse 3D des profils de température dans les forages, toutefois leur localisation sur cette image est purement schématique.

5.3 Influence de la profondeur sur l'enrichissement métallique dans l'eau

5.3.1 Distributions Zn et Cu en profondeur

L'enrichissement en Zn dans l'eau souterraine à proximité puis au contact du SM est visualisable sur le diagramme à surfaces (*box plot*) présenté à la figure 17. Les valeurs médianes de l'empreinte au contact sont entre 700 et 1500 ppb, puis diminuent de 180 – 900 ppb dans le groupe proximal, tandis que le niveau de base est à 5 – 8 ppb. Cette observation ne fait que corroborer les conclusions développées dans les sections ci-dessus : le FE zincifère est de l'ordre de 200 à 500 au contact du SM, puis de l'ordre de 30 à 50 dans la zone proximale. En revanche, ce diagramme permet une observation additionnelle : le FE augmente avec la profondeur, aussi bien au contact qu'à proximité du SM. Ceci est illustré à la figure 17 par les deux flèches rouges en transparence.

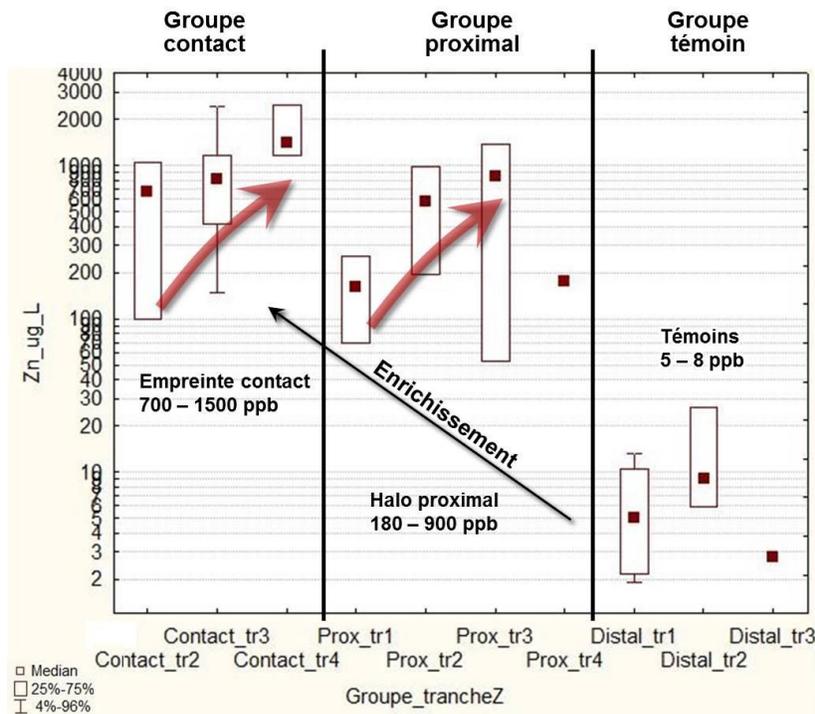


Figure 17. Distribution de Zn dans l'eau souterraine selon la profondeur au contact et à proximité de la lentille Daniel 25.

Le diagramme Zn versus Z_UTM (c.-à-d. élévation par rapport au niveau marin moyen) fait clairement apparaître une tendance de l'enrichissement zincifère qui augmente avec la profondeur. À la figure 18, les halos aussi bien proximaux que de contact sont plus enrichis en profondeur. Cette figure montre une très belle continuité des valeurs entre les deux groupes et avec la profondeur, à partir du niveau de base qui ne semble pas significativement affecté par la profondeur. Le constat qui est fait est un manque d'échantillonnage pour documenter le niveau de base à forte profondeur, pour les raisons décrites en section 5.1.1.

Il est estimé grossièrement, à la figure 18, que le FE en Zn augmente d'un ordre de grandeur tous les 300 m en profondeur.

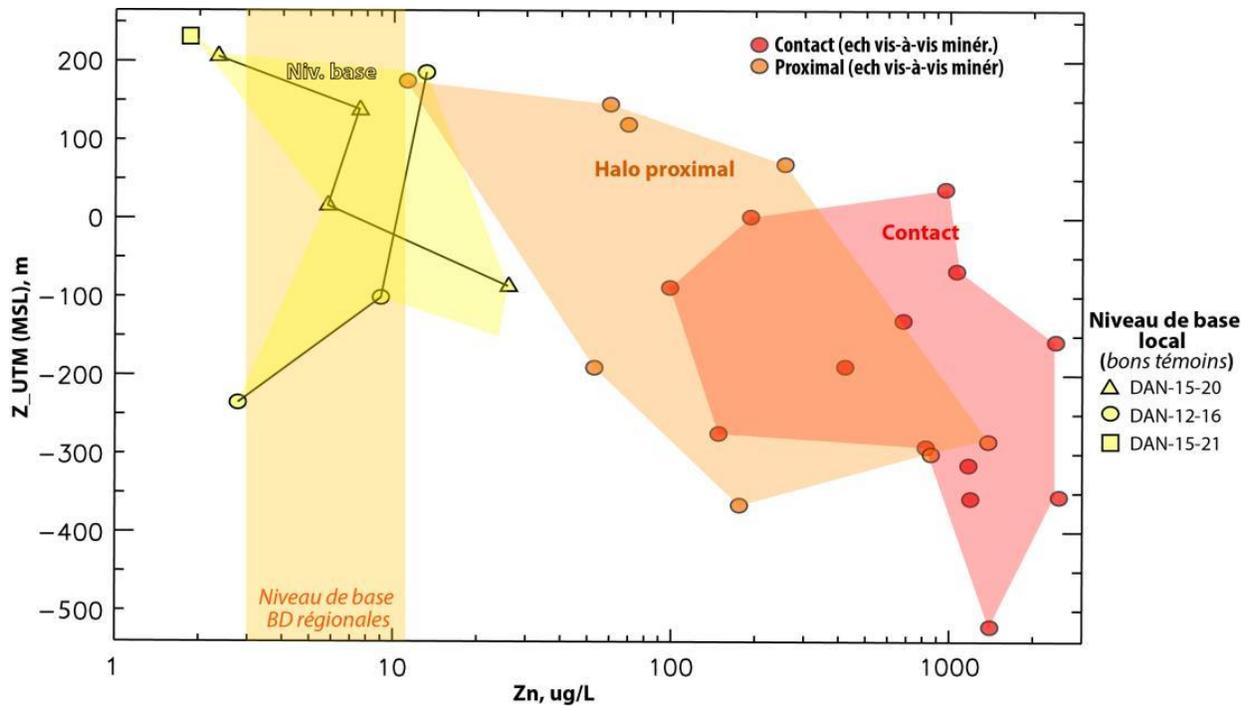


Figure 18. Diagramme Zn dans l'eau souterraine versus élévation (par rapport au niveau moyen de la mer).

Ce comportement est vraisemblablement lié à des mécanismes de solubilisation de Zn plus efficaces dans les eaux profondes, qui sont plus salines et légèrement plus réductrices. Une possibilité est que la solubilité de Zn soit accrue en profondeur en raison de la plus grande concentration de l'eau en Cl, qui est un ligand potentiel de Zn dans les saumures continentales. Cet aspect pourrait être approfondi par le recours à la modélisation géochimique. En revanche, il est observé une augmentation de la teneur du minerai en Zn à partir de -50 m d'élévation (environ à 310 m de profondeur verticalement), ce qui pourrait aussi contribuer à un enrichissement du halo en profondeur.

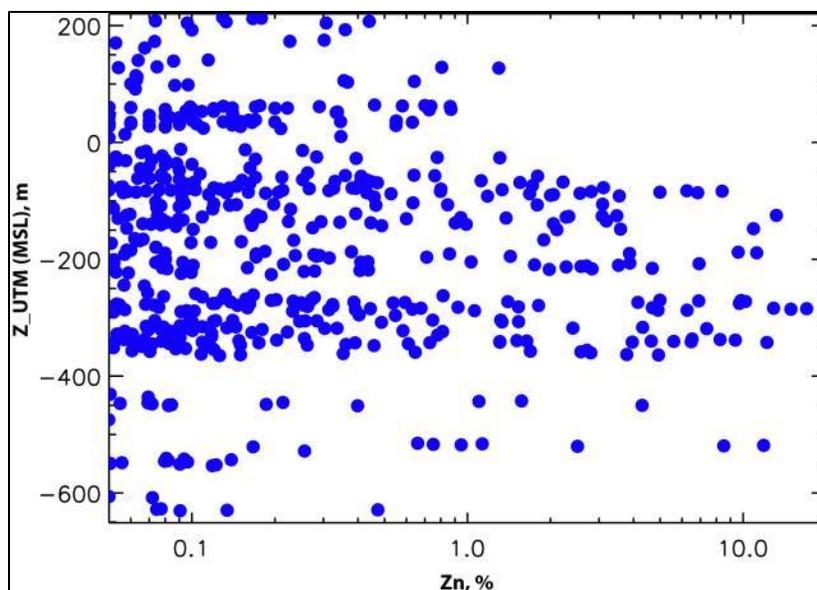


Figure 19. Diagramme Zn dans les échantillons de sulfures massifs (essais) versus élévation (par rapport au niveau moyen de la mer).

Le comportement inverse est observé pour Cu : le halo hydrogéochimique présente de hautes valeurs en subsurface et son enrichissement diminue avec la profondeur pour retourner au niveau de base à forte profondeur.

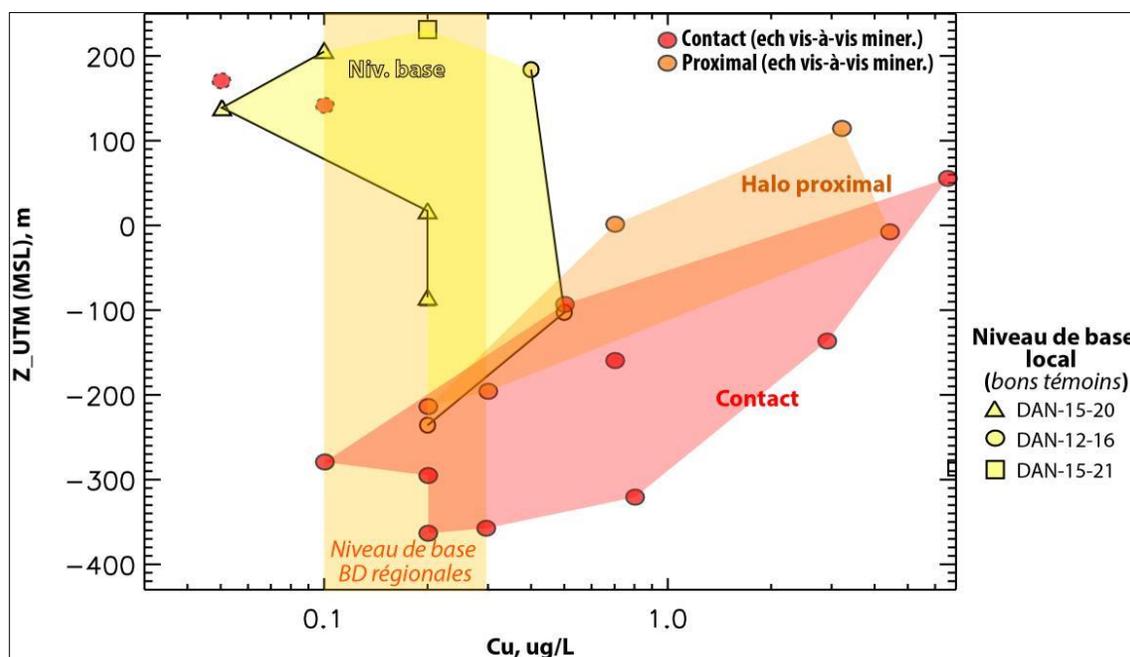


Figure 20. Diagramme Cu dans l'eau souterraine versus élévation (par rapport au niveau moyen de la mer).

Cette opposition de comportement au sein des différents éléments — ici, Zn et Cu — composant l'empreinte du SM est très probablement reliée à l'influence de l'évolution chimique de l'eau profonde sur la solubilité des éléments. Toutefois, seule une analyse des espèces chimiques en présence pour ces deux éléments dans les eaux immatures carbonatées (peu profondes) versus dans les eaux matures chlorurées (profondes) permettrait de mieux comprendre ce comportement. Ce travail n'a pu être réalisé dans le cadre du présent projet. Pour finir, cette opposition de comportement se généralise à l'ensemble des éléments associés à l'empreinte du SM, tel qu'illustré sur les figures placées en annexe, ainsi que par les FE présentés dans la section suivante.

5.3.2 Facteurs d'enrichissement en fonction de la profondeur

Les FE calculés par rapport aux niveaux de base donnés par les 8 échantillons « bons témoins » décrits plus haut sont présentés sur le tableau 3. Rappelons ici que le niveau de base dans la tranche 3 n'est représenté que par un seul échantillon. Par conséquent, les conclusions que l'on peut tirer de ce tableau quant à l'influence de la profondeur sur comportement des différents éléments au contact du SM seront d'autant plus rigoureuses qu'elles sont validées par plusieurs jeux de données, c.-à-d. dans plusieurs tranches de profondeur.

L'opposition de comportement entre Zn et Cu apparaît clairement sur ce tableau, avec des FE de Zn évoluant de 19,67 à 297,32 entre les tranches 1 et 3, tandis qu'ils diminuent de 22,58 à 1,5 pour Cu. Par extension, une distinction est faite entre l'empreinte de subsurface de l'empreinte profonde. L'empreinte de subsurface est marquée par un enrichissement en Al, Sb, Cu, Zn, Co, Ni, U, Zr, Ce, V, tandis que l'empreinte profonde est enrichie en Zn, U, Ni, Mo, Zr, Co, As, Al, Sb. Les éléments qui sont enrichis de façon plus nettement marquée dans l'empreinte profonde sont Zn, U, Ni, Mo, tandis que ceux montrant la tendance inverse, c.-à-d. à être davantage enrichis à faible profondeur, sont essentiellement Al et Cu, deux éléments très peu mobiles. Les marqueurs (*pathfinders*) Sb et Co ont un comportement plus mitigé, et des conclusions moins robustes peuvent être tirées des données présentées ici puisque les tendances ne se valident pas sur les 3 jeux de données.

Tableau 3. Évolution des facteurs d'enrichissement au contact du SM en fonction de la profondeur

	Mediane contact-proximal /mediane temoins		
	Tranche 1 : prof vert = 30 à 220 m	Tranche 2 : prof vert = 220 à 400 m	Tranche 3 : prof vert = 400 à 590 m
Zn	19.67	69.12	297.32
U	6.99	5.50	233.50
Ni	12.21	17.00	24.00
Mo	1.56	3.07	12.20
Zr	4.00	3.88	9.00
Co	14.74	37.83	7.41
As	0.95	0.37	6.50
Al	129.29	27.07	3.96
Sb	28.11	38.50	3.17
Ce	2.96	7.51	2.00
Si	0.89	0.73	1.81
Mg	1.39	3.34	1.80
AlkTot	1.22	1.09	1.66
Cu	22.58	8.13	1.50
Sc	1.03	1.03	1.26
Fe	0.72	0.57	1.21
V	1.05	6.80	1.05
pH	1.02	0.99	1.03
Au	1.00	1.00	1.00
SO4	0.45	0.73	0.99
Mn	1.09	1.22	0.91
S	0.36	0.66	0.46
P	0.73	1.60	0.44
Ba	0.93	0.32	0.39
Y	1.25	6.69	0.30
Cs	7.00	1.39	0.24
K	1.23	1.27	0.20
W	0.04	0.51	0.18
Rb	1.10	1.32	0.14
TDS	0.57	1.29	0.13
Cond	0.73	1.63	0.12
Ca	0.51	1.10	0.11
Li	0.63	1.96	0.08
Cl	0.36	3.14	0.07
Br	0.34	3.09	0.07
Na	0.81	1.56	0.07
Sr	0.42	1.29	0.05
B	0.24	0.79	0.04

> 2

> 10

> 100

5.3.3 Fractionnement métallique vertical et horizontal du panache hydrogéochimique : diagramme R-R

Ce système présente deux types de fractionnement affectant l'empreinte hydrogéochimique du corps métallifère :

- Le premier fractionnement est relativement vertical et se produit avec la profondeur, autrement dit avec le caractère plus mature de l'eau. C'est celui abordé dans les deux sections précédentes. La solubilité des éléments évolue avec la profondeur du fait des changements de pH, Eh, T, ainsi que de la composition de l'eau en éléments majeurs et la disponibilité de certains ligands incluant le Cl.
- Le deuxième fractionnement est grossièrement horizontal et se produit le long des chemins d'écoulement, avec la dispersion du panache émanant du SM. Il est causé par les écarts de mobilité entre les éléments constituant l'empreinte ainsi que par l'importance de l'enrichissement au contact du SM. Les éléments les plus mobiles et/ou les plus enrichis à la source sont détectables sur de plus grandes distances.

Afin de visualiser simultanément ces deux types de fractionnement, les valeurs des coefficients de corrélation de Pearson sont projetées sur un diagramme binaire, pour produire un diagramme de type R-R. (figure 21). Ce type de diagramme se lit de manière analogue au résultat d'un calcul de composantes principales. Chaque axe du diagramme exprime la corrélation, pour chaque élément, avec la distance au SM. L'axe horizontal correspond à la tranche peu profonde et l'axe vertical à la tranche plus profonde. Le fractionnement métallique de l'empreinte, avec la profondeur, est visualisable ici par le fait que plusieurs éléments sont davantage corrélés au SM sur un seul des deux axes. Enfin, il faut mentionner que ces valeurs de corrélation entre la concentration et la distance au SM ne reflètent pas l'amplitude de l'enrichissement ni la dimension de la zone d'influence, mais rigoureusement la « régularité linéaire » de la relation entre l'enrichissement et la distance. Il s'agit d'une information différente de celle présentée dans les sections précédentes.

Ce diagramme confirme, par une approche différente, que Zn est le meilleur marqueur de la minéralisation zincifère. Il est suivi de très près par Co, bien que le FE affectant Co soit nettement moins important que celui de Zn (tableau 3). Les autres marqueurs sont Sb, Ni, Al, V et Ce, pour les jeux de données peu profonds et très profonds, ainsi que Cu, Zr, Y, Mg, Nb, U et Mo pour le jeu de données peu profond. U et Mo apparaissent ici, davantage corrélés au SM dans les niveaux peu profonds tandis que leur FE apparaît plus fort dans les niveaux très profonds suivant l'approche décrite dans la section précédente. Ceci exprime le fait que ces éléments sont fortement enrichis en profondeur, mais sur une plus courte distance de dispersion : le signal se perd rapidement.

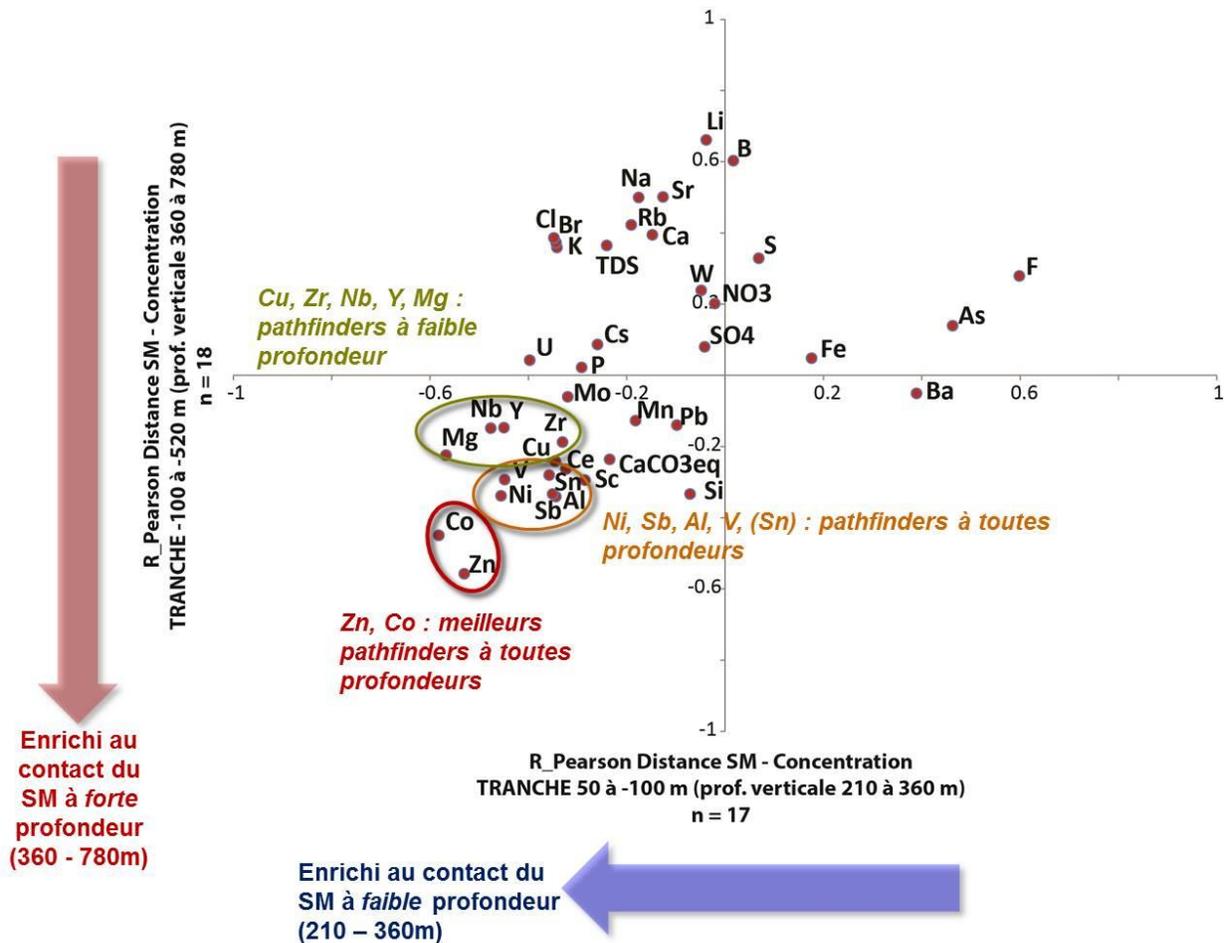


Figure 21. Diagramme R-R des concentrations par rapport à la distance au corps métallifère, dans les tranches peu profondes et profondes du socle. La distance au SM a été établie pour chaque échantillon en calculant la distance la plus courte (en 3D) d'un essai Zn>0,5 % dans la fenêtre de profondeur ± 40 m de l'échantillon.

5.4 Influence de l'écart de profondeur de forage entre l'échantillon et la minéralisation : tests « aveugles »

Des « tests aveugles » ont été réalisés afin de documenter l'impact de la profondeur d'échantillonnage en contexte d'exploration, c.-à-d. où l'on ne connaît pas la profondeur de la lentille. Dans cette optique, plusieurs forages du groupe PROXIMAL ont été échantillonnés à 3 ou 4 profondeurs différentes.

Les résultats de ces tests sont présentés à la figure 22, pour les analyses en Zn. L'enveloppe formée par l'empreinte, telle que décrite dans les sections précédentes, a été placée en arrière-plan. Pour rappel, cette enveloppe était définie par les échantillons prélevés, soit directement au contact du SM (groupe CONTACT) à proximité du SM et à la même profondeur (± 40 m). À la

figure 22A, la profondeur projetée de l'intersection du SM la plus proche du forage est indiquée, pour chaque forage, par un trait épais rouge (pour chaque forage, l'échantillon le plus proche de ce trait est donc celui qui était retenu pour définir l'empreinte proximale dans les sections précédentes). Il est observé que les valeurs zincifères dans le haut d'un forage, passant à proximité d'un corps métallifère, demeurent nettement anormales et suivent la tendance générale de l'enveloppe. Ceci est très net pour les 6 forages surlignés en orange, qui sont aussi les plus proximaux à la lentille Daniel 25 (Fig. 22B).

Les deux forages surlignés en bleu sont les plus distaux, le signal zincifère y diminue très rapidement dans la partie supérieure du forage et retourne au niveau de base.

5.5 Détection du corps métallifère par les échantillons proximaux

En restant un contexte d'exploration, où la position de la lentille est inconnue, il est particulièrement intéressant de chercher à établir si les échantillons d'eau souterraine prélevés à proximité de la lentille auraient permis, dans le cas présent, au géologue d'exploration de détecter le corps minéralisé.

Prenons l'exemple de trois forages proximaux au SM : DAN16-48, DAN15-28 et DAN16-51. Dans les trois forages, aucun sulfure massif n'est intercepté, et aucune valeur zincifère n'est enregistrée à l'analyse de carotte (*assay*) excepté un échantillon de 1,2 m à 0,14 % Zn dans le forage DAN16-48. En revanche, le halo hydrogéochimique est intercepté dans les 3 forages avec des anomalies très fortes : 99^e, 99^e et 97^e centile. Ces informations sont synthétisées dans le tableau 4, ci-dessous.

Tableau 4. Synthèse des analyses de roche et de l'eau pour trois forages proximaux au SM.

	Analyse de carotte		Analyse de l'eau	
DAN16-48	Pas de SM	0.14% Zn sur 1.2 m	Halo intercepté	780 ppb (> 99 ^e me centile)
DAN15-28	Pas de SM	<i>Aucune senteur</i>	Halo intercepté	1370 ppb (>99 ^e me centile)
DAN16-51	Pas de SM	<i>Aucune senteur</i>	Halo intercepté	174 ppb (>97 ^e me centile)

N'importe lequel de ces trois forages aurait donc permis au géologue d'exploration de suspecter très fortement la présence d'un corps zincifère dans l'environnement des forages. Ces exemples concrets illustrent parfaitement la plus-value apportée par l'analyse de l'eau souterraine pour l'exploration, puisque l'hydrogéochimie permet de détecter la minéralisation là où l'analyse de roche ne le permet pas. Il y a donc augmentation significative de la portée des informations accessible par un forage. Cette conclusion est valable dans tous les forages proximaux du levé, où aucune senteur n'est rapportée à l'analyse de roche.

5.6 Ciblage à l'échelle de la propriété

Pour finir, les résultats des analyses sur les échantillons multiniveaux du groupe DISTAL sont présentés à la figure 23, ainsi que leur localisation. Une distinction très nette est apparente entre ce qui a été appelé, dans les sections précédentes, des « bons témoins » et des « mauvais témoins » dont certains sont à proprement parler d'excellentes cibles d'exploration. Les forages surlignés en vert à la figure 23 sont localisés à l'est de Daniel 25. À la figure 23A, ces forages se localisent sur la limite inférieure de l'enveloppe de l'empreinte, ce qui est cohérent avec le fait

qu'ils soient très distaux, mais encore dans la zone d'influence du SM de Daniel 25, ou bien de petits corps minéralisés satellites. En revanche, les forages surlignés en jaune vif sont clairement au cœur de l'enveloppe de l'empreinte, tandis qu'ils sont localisés très à l'ouest de Daniel 25. L'intensité de l'enrichissement mesuré ici indique qu'il s'agit d'un halo très proximal (probablement inférieur à 200 m, par analogie avec le halo de Daniel 25), il est donc très peu plausible que cet enrichissement soit causé par l'influence du gîte Daniel 25. Ces anomalies traduisent au contraire la présence d'un autre corps métallifère, localisé quelques centaines de mètres à l'ouest du forage DAN14-18 (étoile sur la Fig. 23B). Par ailleurs, le forage surligné en orange est en périphérie de l'enveloppe, et correspond vraisemblablement au halo distal de ce même corps métallifère inconnu. Ceci constitue donc une cible de premier ordre.

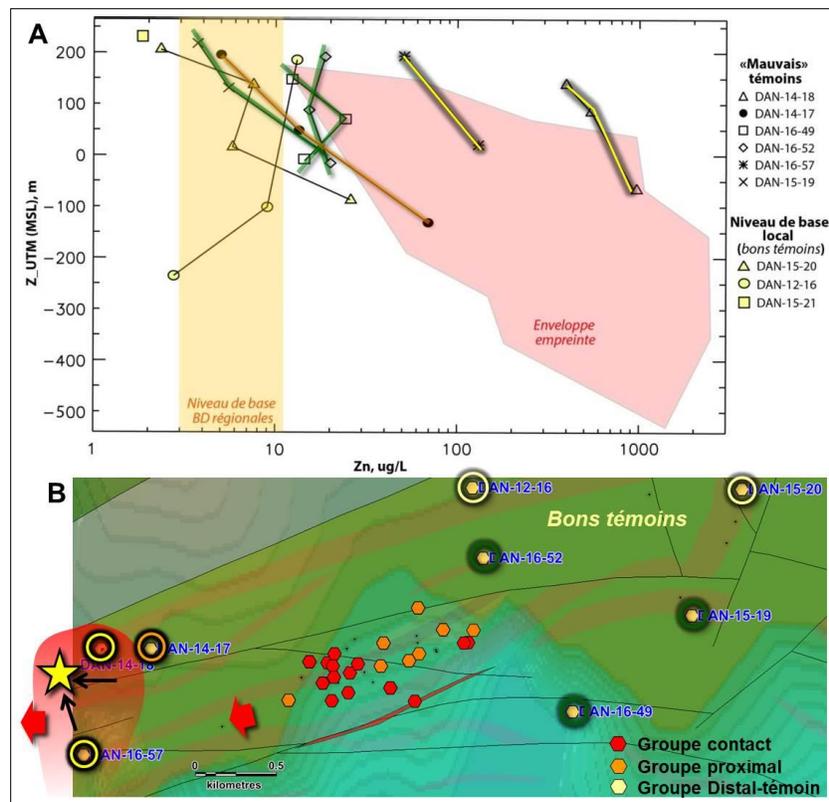


Figure 23. Analyses et localisation des échantillons multiniveaux du groupe DISTAL.

A) diagramme Zn versus profondeur, B) localisation des forages. L'étoile indique l'emplacement approximatif de cible métallifère dont émane le panache représenté en rouge et intercepté par les forages entourés en jaune.

6.1 Tests de mode opératoire

Cette section présente les résultats des doublets et triplets de protocoles d'échantillonnage. Les trois différents protocoles testés ont été décrits plus haut. Il s'agit de l'échantillonnage passif au *bailer*, de l'échantillonnage à faible débit sans purge (*lowflow (LF)*), et de l'échantillonnage à fort débit avec purge (*highflow (HF)*). Des triplets ont été réalisés dans 4 puits, ainsi que deux doublets *LF-bailer* et *HF-bailer*.

Les résultats de ces tests, exposés sur les figures 24, 25 et 26, sont édifiants. L'ensemble des échantillons *HF* donne une eau très immature indiquée par de très faibles valeurs de Cl et Br (Fig. 25) et par une très faible TDS (Fig. 26). Ceci révèle que l'eau pompée provient exclusivement de la tranche la plus superficielle de l'aquifère. Tout se passe comme si la dépressurisation du puits générée par le pompage était compensée par un approvisionnement en eau depuis les sources les plus proches de l'exutoire du système, c.-à-d., de la pompe. Par conséquent, seules les fractures les plus superficielles sont mises à contribution. Ces résultats montrent que le mode d'échantillonnage *HF* ne permet pas de prélever une eau profonde. Les deux forages du groupe CONTACT, sur lesquels des doublets et triplets ont été effectués, montrent clairement que la réponse obtenue en *HF* ne restitue aucun signal zincifère. En effet, pour le forage DAN16-47, la valeur de Zn obtenue en *HF* est régionale (8,8 ppb) alors que ce forage recoupe le sulfure massif (1,3 % Zn sur 1 m). De façon similaire, dans le forage DAN15-25, qui est le forage de découverte du gîte, Zn en *HF* est régional (4 ppb) alors que le forage passe au cœur haute-teneur de la lentille zincifère avec 10,2 % Zn sur 0,9 m. Dans ces deux exemples, en revanche, la minéralisation est détectée par le signal mesuré au *bailer* : respectivement, 61,1 et 146,5 ppb (env. 96^e et 99^e centiles de la BD régionale PACES-UQAT).

De la même manière, le forage proximal DAN15-28, ressort très anomal au *bailer* (1370 ppb, >>99^e centile, pour l'échantillon prélevé à la même profondeur que le SM proximal), tandis qu'il est régional au *HF* et *LF* (6,3 et 9,9 ppb, respectivement). Ce forage passe à environ 150 m de la lentille (voir carte des forages en annexe 6).

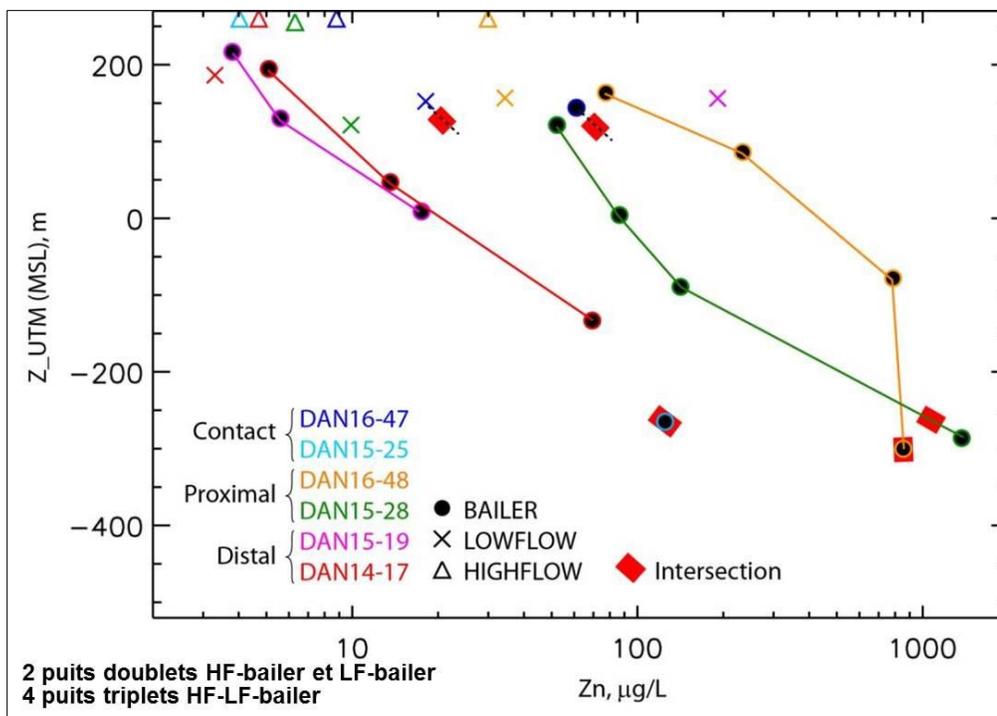


Figure 24. Diagramme Zn versus élévation pour les résultats de tests opératoires (doublet et triplet de protocole d'échantillonnage), avec catégories de mode opératoire

En ce qui concerne les réponses obtenues en *LF*, il semble que celles-ci suivent la même tendance que les réponses obtenues au *bailer*, dans les niveaux superficiels exclusivement, puisque le *LF* est limité en profondeur par la longueur de la tubulure (cf. section précédente). Un échantillon (DAN15-19) donne une valeur très élevée tandis qu'il s'agit d'un forage distal, ce qui est attribué à du bruit.

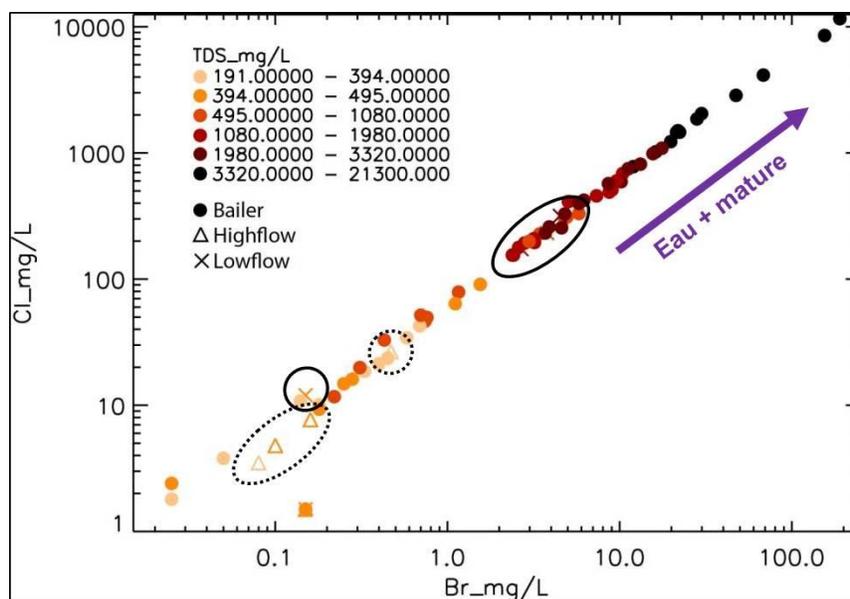


Figure 25. Diagramme Br versus Cl avec catégories de mode opératoire. Les traits pointillés et continus indiquent respectivement les échantillons *HF* et *LF*.

L'eau prélevée par le mode opératoire *LF* semble bien correspondre à l'eau de l'aquifère environnant à la profondeur désignée. Ceci est indiqué d'une part par les valeurs de Cl et Br qui correspondent bien à celle attendue considérant la profondeur, d'après la réponse obtenue au *bailer* (Fig. 25). D'autre part, avec ce mode opératoire, une augmentation de la TDS avec la profondeur (Fig. 26) reflète l'augmentation de la maturité de l'eau en profondeur. En allant plus loin, l'évolution de la TDS avec la profondeur d'échantillonnage suivant les différents protocoles d'échantillonnage (Fig. 26) offre plusieurs observations intéressantes. Pour le jeu de données au *bailer*, une relation très claire est observable, mais par contre très bruitée entre ces deux variables. Dans un milieu aquifère idéal, homogène isotrope et continu, la relation devrait être parfaite et traduire simplement l'augmentation du temps de résidence de l'eau avec la profondeur. Le fait que cette relation soit bruitée peut être interprété comme le reflet de l'hétérogénéité et de la multiplicité des chemins d'écoulement au sein du milieu aquifère discontinu constitué par le socle. Tel qu'évoqué précédemment, l'aquifère de socle est caractérisé par une porosité de fracture, par nature très discontinue, de sorte que les chemins d'écoulement sont multiples. Deux gouttes d'eau voisines peuvent avoir parcouru des chemins d'écoulement très différents, correspondant à des temps de résidence très inégaux. Une autre observation est que la droite de régression linéaire entre logs (Zn) et Z obtenus pour les jeux de données *bailer* et *LF* ne sont pas égales : le coefficient de la relation linéaire est nettement plus fort pour le premier jeu de données que pour le deuxième. Cela peut être soit l'expression d'une dilution systématique des échantillons prélevés au *bailer*, possiblement causé par une étanchéité imparfaite lors de la remontée, soit par l'effet d'une stratification chimique s'opérant dans le puits. La stratification chimique résulte des mouvements verticaux motivés par les écarts de densité d'eaux entrant dans le puits par différentes fractures, à différentes profondeurs. Ce phénomène demeure très

mal connu à ce jour. Le mode *bailer* est potentiellement affecté par ce phénomène étant donné que l'eau prélevée est directement celle présente dans le puits. À l'inverse, le mode *LF* prélève théoriquement l'eau de l'aquifère, puisqu'une légère dépressurisation est générée au regard d'une entrée d'eau (fracture), de sorte que la stratification chimique dans le puits ne devrait avoir d'impact.

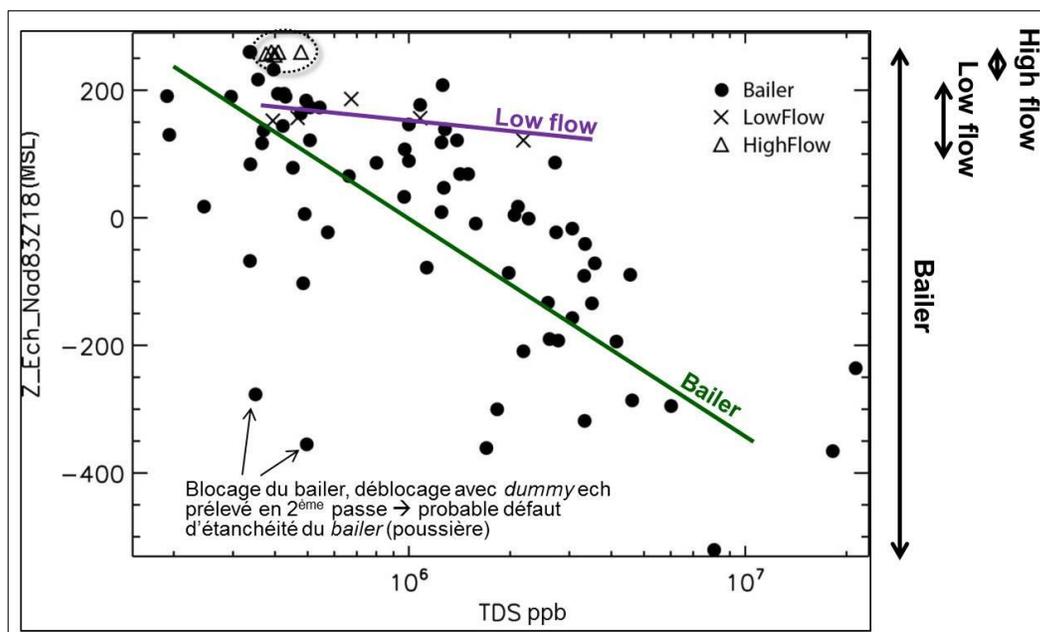


Figure 26. Diagramme TDS versus élévation par rapport au niveau marin moyen, avec catégorisation de mode opératoire. Le contour pointillé indique les échantillons HF.

6.2 Tests d'extraction

Les chroniques de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau montrent des variations drastiques dans les minutes (10, 20 min) suivant l'extraction au *bailer*. En particulier, il est constaté une chute de Eh, une augmentation du pH et une diminution de la conductivité avant stabilisation sur un plateau. Ceci est attribué à l'équilibrage avec le CO₂ atmosphérique. Ce phénomène est relativement documenté dans la littérature. Il est d'autant plus difficile de mesurer correctement ces paramètres par ce type de méthode *ex-situ* que, lors de l'extraction de l'eau et du plongement de la sonde dans le récipient. La sonde met quelques minutes à mesurer les paramètres, minutes durant lesquelles l'équilibrage a déjà commencé à se produire. La conclusion est que les paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine ne peuvent être mesurés de manière adéquate que par des méthodes *in situ* (insertion d'une sonde multiparamètre dans les puits).

Étant donné que la solubilité de la plupart des éléments est fortement conditionnée par les propriétés Eh-pH de l'eau, il est possible d'anticiper que ces variations s'accompagnent de changements importants de la composition de l'eau, aussi bien en éléments majeurs, mineurs, traces qu'ultratraces. La baisse de conductivité reflète d'ailleurs la perte d'éléments majeurs associée à ces équilibres. Des tests d'extraction ont donc été réalisés dans le cadre de ce projet afin de déterminer si ce phénomène constituait une source significative d'imprécision pour l'analyse de la composition géochimique de l'eau. D'un échantillon à l'autre, la fermeture du flacon peut être complétée à des temps variables après ouverture du *bailer* (typiquement entre 2 et 6 min) ; les présents tests visaient donc à répondre à la question de la nécessité de réguler ce paramètre dans le protocole d'extraction.

Trois tests ont été effectués. Ils consistent à prélever deux échantillons successifs avec le même remplissage de *bailer*, à quelques minutes d'intervalle. Les écarts de temps sont A) 3 min 50 s, B) 3 min, C), 6 min 22 s. Les résultats sont exposés à la figure 27. Aucun écart significatif n'est à reporter pour ce qui est des éléments majeurs. Ceci est relativement troublant, en première approximation, étant donnée la baisse de TDS enregistrée par la sonde. Cela signifie que la diminution de TDS exprimée par la sonde traduit uniquement le temps de mesure requis par celle-ci (délai de stabilisation de la mesure) et non un changement de propriétés de l'eau *sensu stricto*. Par ailleurs, à 6 min 30 s et 6 min 40 s, des écarts significatifs sont observés (un demi à un ordre de grandeur) affectant les éléments Zr, Co, V, Ni, Li, NO₃, Al, Zn, B. À 8 min et 22 s, en revanche, les écarts deviennent très importants et touchent la plupart des éléments non majeurs.

En conclusion, le délai d'extraction **est** un paramètre critique, et doit être régulé lors de l'échantillonnage. Ces tests montrent que même à 3 min d'intervalle, des écarts significatifs sont observés pour plusieurs éléments critiques pour l'exploration, tels que Zn, Al, V. À toute fin pratique, il est recommandé de conserver une marge d'écarts inférieure à 1 min et 30 secondes sur l'ensemble d'un levé, idéalement en restant dans la tranche [2 min 30 s – 4 min] après ouverture du *bailer*.

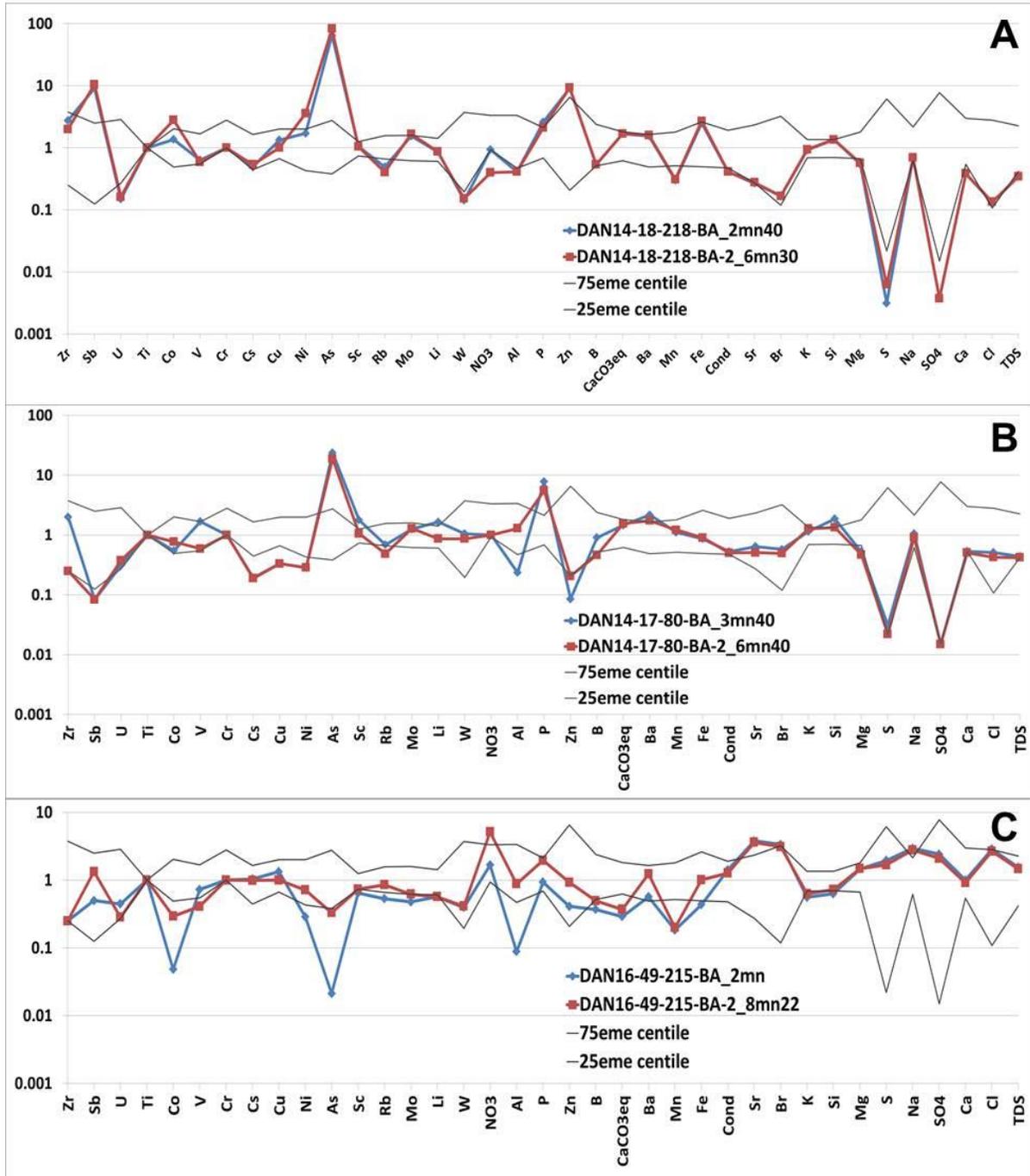


Figure 27. Résultats des doublets d'extractions. Les valeurs sont normalisées sur la médiane.

7 CONCLUSIONS

Ce projet visait à étudier l'usage de l'analyse géochimique de l'eau souterraine pour l'exploration minérale. Le fort potentiel de cette méthode de prospection avait été établi à l'occasion d'un précédent projet de recherche, qui concluait sur la nécessité de poursuivre les investigations au moyen d'un levé plus substantiel, sur un autre secteur, à des profondeurs plus grandes. Le présent projet impliquait donc une seconde phase d'échantillonnage, explorant le panache hydrogéochimique à forte profondeur aux alentours du sulfure massif zincifère du gîte Daniel 25 (camp de Matagami, Abitibi, Québec). Quatre-vingt-trois (83) échantillons d'eau ont été prélevés dans 31 différents forages d'exploration en octobre et novembre 2017, à des profondeurs atteignant 965 m le long du forage. La plupart des prélèvements ont été réalisés au moyen d'un *bailer*, toutefois plusieurs doublets et triplets ont été effectués dans le but de tester deux autres protocoles : l'échantillonnage à faible débit (pompe péristaltique) et à fort débit avec purge.

Les résultats confirment la présence d'un halo hydrogéochimique très clair développé autour de la lentille à toutes les profondeurs investiguées soit, depuis la subsurface jusqu'à 780 m de profondeur verticale. Le halo zincifère est détecté jusqu'à 600 m de distance horizontale pour le contour du 97^e centile. La forme du halo est allongée dans la direction E-O, reflet de l'anisotropie de conductivité hydraulique du réseau de fractures constituant l'aquifère. Le retour au niveau médian régional (env. 10 ppb) est estimé à plus de 2 km vers l'ouest et de l'ordre de 600 m vers le nord. En première approximation, la profondeur semble avoir une légère influence sur la géométrie du halo zincifère, qui apparaît nettement plus enrichi, mais possiblement moins étendu. Toutefois, la profondeur exerce un contrôle important sur la suite d'éléments composant l'empreinte.

L'empreinte hydrogéochimique du corps métallifère est marquée par un très fort enrichissement (facteur d'enrichissement, FE > 100) en Zn, U, Al, un enrichissement fort (FE entre 10 et 100) en Sb, Ni, Mo, Co, Cu, et un enrichissement léger (FE < 10) en Zr, Ce, V, Y, Mg, Nb, Sn. Un fractionnement de cette empreinte est observé avec la profondeur : le facteur d'enrichissement de Zn au contact du sulfure massif augmente très nettement avec la profondeur, tandis qu'il diminue pour les marqueurs (*pathfinder*) Cu et Al. Il demeure relativement constant pour les marqueurs Sb, Co, Ni, tandis que l'effet de la profondeur sur le comportement des marqueurs U et Mo au contact du sulfure massif, demeure mal contraint. Pour l'élément Zn, le FE est compris entre 200 et 500 au contact du corps métallifère, toutes profondeurs confondues, puis entre 30 et 50 dans la zone proximale.

Sur le plan opératoire, ce levé a largement bénéficié de l'expérience acquise durant la première campagne réalisée en 2016. L'échantillonnage pour l'analyse à haute résolution de la géochimie de l'eau souterraine dans des forages d'exploration au moyen d'un *bailer* est une opération très délicate. Un certain nombre de précautions sont critiques pour l'obtention de données de qualité. Des protocoles ont pu être perfectionnés ici au terme des deux campagnes successives, grâce à une place importante accordée au développement expérimental de la méthode, ainsi que par de fréquents retours aux notes de terrain lors de l'analyse des résultats géochimiques. Les tests de

mode opératoire effectués ont permis d'établir des protocoles d'échantillonnage et d'extraction robustes et adaptés aux contextes du terrain québécois.

Ce levé fournit des exemples concrets illustrant la plus-value apportée par l'analyse de l'eau souterraine pour l'exploration minérale. Les sulfures massifs ont une empreinte typiquement discrète dans la roche en termes de valeurs métalliques, de sorte que la plupart des forages proximaux au gîte (< 500 m) ne révélaient aucunement la présence du corps minéralisé à l'analyse de roche. En revanche, les prélèvements d'eau réalisés dans tous les forages proximaux révèlent très clairement l'empreinte du corps minéralisé. En contexte d'exploration, ces résultats auraient permis au géologue d'exploration de suspecter très fortement la présence du sulfure massif dans l'environnement.

Il est donc démontré très clairement dans cette étude que l'analyse de l'eau souterraine permet de détecter la minéralisation là où l'analyse de roche ne le permet pas. Ceci procure une augmentation significative de la portée des informations accessibles par un forage. L'eau présente par ailleurs plusieurs avantages pratiques considérables par rapport aux médias rocheux et sédimentaires traditionnellement échantillonnés : c'est un médium très homogène (la reproductibilité est excellente), il offre des résultats robustes, il est facile à analyser (préparation minimale au laboratoire). Enfin, les anomalies se produisant dans ce médium à proximité d'un sulfure massif zincifère sont d'une extraordinaire amplitude, par rapport aux variations normales du niveau de base zincifère causée typiquement par la variabilité de Eh, pH, et de la disponibilité des ligands (composition majeure de l'eau).

Pour finir, les résultats présentés dans ce rapport sont relativement bruts. Il n'a été fait presque aucun traitement avancé, compte tenu des délais impartis au projet. Dans un travail de traitement plus approfondi, il conviendrait d'analyser les réactions et les phases minérales impliquées dans la solubilisation des éléments à partir du corps métallifère. Ceci permettrait de contraindre les facteurs affectant l'efficacité des réactions, et par conséquent le potentiel de formation du halo, sa composition et son amplitude, selon le contexte hydrogéologique. L'analyse des équilibres entre les phases minérales et l'eau, par le biais de la modélisation des réactions géochimiques se produisant durant les échanges eau-roche, fournirait très certainement des indices d'exploration plus efficaces que les valeurs brutes considérées ici. En effet, les indices de saturation de l'eau par rapport à certaines phases minérales présentes dans le corps minéralisé ou dans l'enveloppe d'altérations hydrothermales associée, constitueraient vraisemblablement d'excellents guides d'exploration, potentiellement plus efficaces que les valeurs brutes.

8 REFERENCES

- Boucher R., Doyon V., Namour R., Pérez R.P et Ratthé G., 2017. Rapport des travaux – Propriété Daniel, GLENCORE Inc., 91 p.
- Bowell R.J., 2014. Hydrogeochemistry of the Tsumeb Deposit: Implications for Arsenate Mineral Stability. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 79:589-627
- Carey M.L., McPhail D.C. et Taufen P.M., 2003. Groundwater flow in playa lake environments: impact on gold and pathfinder element distributions in groundwaters surrounding mesothermal gold deposits, St. Ives area, Eastern Goldfields, Western Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3:57-71
- Creasey C.L. et Flegal A.R., 1999. Elemental analyses of groundwater: demonstrated advantage of low-flow sampling and trace-metal clean techniques over standard techniques. *Hydrogeology Journal*, 7(2): 161-167.
- Daigneault R., Mueller W.U. et Chown E.H., 2002. Oblique Archean subduction: accretion and exhumation of an oceanic arc during dextral transpression, Southern Volcanic Zone, Abitibi Subprovince Canada. *Precambrian Res.* 115:261-290.
- Caritat P., McPhail D.C., Kyser K. et Oates C.J. 2009. Using groundwater chemical and isotopic composition in the search for base metal deposits: hydrogeochemical investigations in the Hinta and Kayar Pb–Zn districts, India. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 9(3): 215-226.
- Dzombak D.A. et Morel F.M.M.M., 1990. *Surface Complexation Modeling*. J. Wiley and Sons, New York, 393 p.
- Eppinger R.G., Fey D.L., Giles S.A., Kelley K.D. et Smith S. M., 2012. An exploration hydrogeochemical study at the giant Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit, Alaska, USA, using high resolution ICP-MS. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 12:211–226
- Gascoyne M. 2004. Hydrogeochemistry, groundwater ages and sources of salts in a granitic batholith on the Canadian Shield, southeastern Manitoba. *Applied Geochemistry* 19:519–560
- Genna D., 2015. Traceurs géochimiques pour guider l'exploration des SMV le long des tuffites de Matagami (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi).
- Giblin A. et Mazzucchelli R., 1997. Groundwater geochemistry in exploration: an investigation in the Black Flag district, Western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 44(4):433-443.
- Gilliss M.L., Al T.A., Blowes D.W., Hall G.E.M. et MacLean B., 2004. Geochemical dispersion in groundwater from a weathered Cu-Zn deposit in glaciated terrain. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 4 : 291-305.

- Gray D.J., 1998. Characteristics of gold distribution and hydrogeochemistry at the Carosue Dam Prospect, Western Australia: Preliminary Report.
- Gray D.J., 2001. Hydrogeochemistry in the Yilgarn Craton. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 1:253-264.
- Langmuir D. et Chatham J.R., 1980. Groundwater prospecting for sandstone type uranium deposits: a preliminary comparison of the merits of mineral solution equilibria, and single-element tracer methods. *J. Geochem. Explor.*, 13:201-219.
- Leybourne M.I., et Cameron E.M., 2006. Composition of soils and groundwaters at the Pampa del Tamarugal: anatomy of a fossil geochemical anomaly derived from a distant porphyry copper deposit. *Economic Geology*, 101:1569-1581.
- Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec (MDDEPQ), 2011. Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales : cahier 3 – Échantillonnage des eaux souterraines, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, 60 p., 1 annexe.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), 2014. *Protocole d'échantillonnage de l'eau de surface pour l'analyse des métaux en traces*, Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, ISBN 978-2-550-69205-8 (PDF), 19 p.
- Noble R.R.P., Lintern M.J., Gray D.G., Reid N. et Anand R.R., 2013. Metal migration at the North Miitel Ni sulphide deposit in the southern Yilgarn Craton: Part 1, regolith and groundwater. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 13(2):67-85.
- Pauwels, H., Tercier-Waeber, M.-L., Arenas, M., Castroviejo, R., Deschamps, Y., Lassin, A., Graziottin, F., et Elorza, F.-J., 2002. *Chemical characteristics of groundwater around two massive sulphide deposits in an area of previous mining contamination, Iberian Pyrite Belt, Spain. Journal of Geochemical Exploration*, 75:17-41.
- Puls R. W. et Barcelona M. J., 1995. *Low-flow (minimal drawdown) ground-water sampling procedures*: US Environmental Protection Agency Research Brief EPA.
- Quian J., Li, S. et Cao C., 2008. Geochemical characteristics and source analysis of inflow of mine water in Wang'ershan Gold Mine, Shandong. *Chinese Journal of Geochemistry*, 27(1), 82
- Rafini S., 2017. Hydrogéochimie des eaux souterraines appliquées à l'exploration minérale – Phase 1, Projet CONSOREM 2016-05, 65 p.
- Stober I. et Bucher K., 1999. Origin of salinity of deep groundwater in crystalline rocks. *Terra Nova-Oxford*, 11(4):181-185
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA), 1996. *Method 1669: Sampling Ambient Water for Trace Metals at EPA Water Quality Criteria Levels*, U.S. EPA, Office of Water, Engineering and Analysis Division (4303), Washington.

Veillette J. J., Paradis S. et Thibaudeau P, 2003. Les cartes de formations en surface de l'Abitibi, Québec. Geological Survey of Canada.

ANNEXE 1 : PLANCHES PHOTOS

PHOTOS A : Échantillonnage au *bailer*



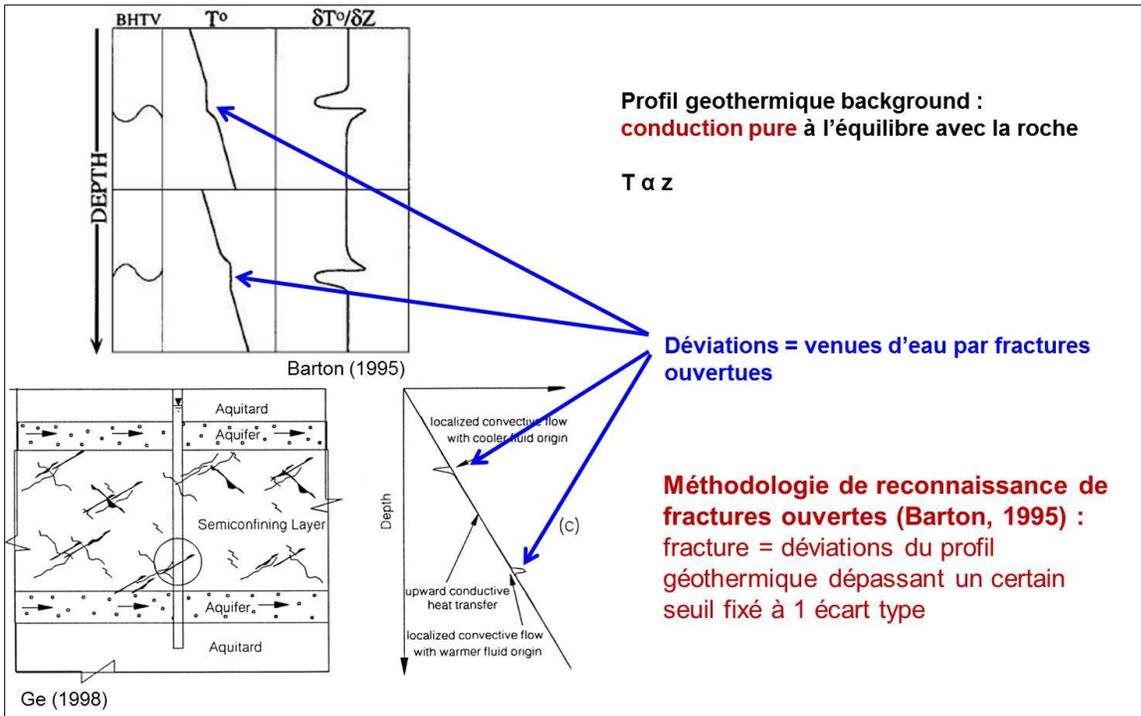
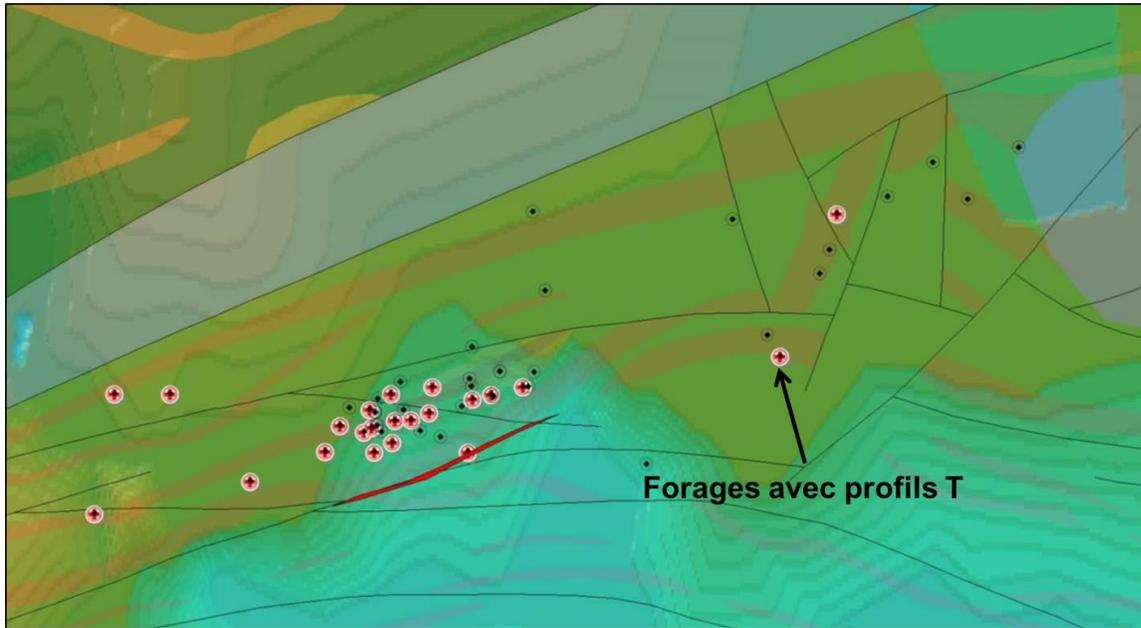
PHOTOS B : Échantillonnage à faible débit avec pompe péristaltique

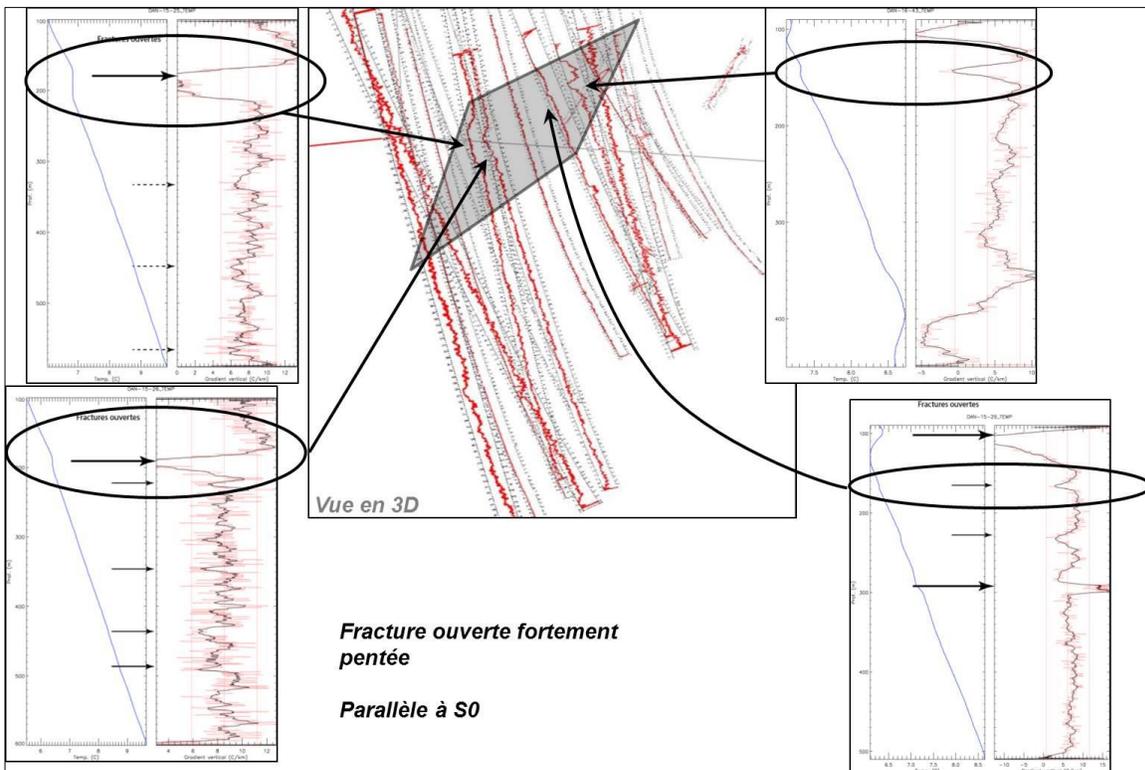
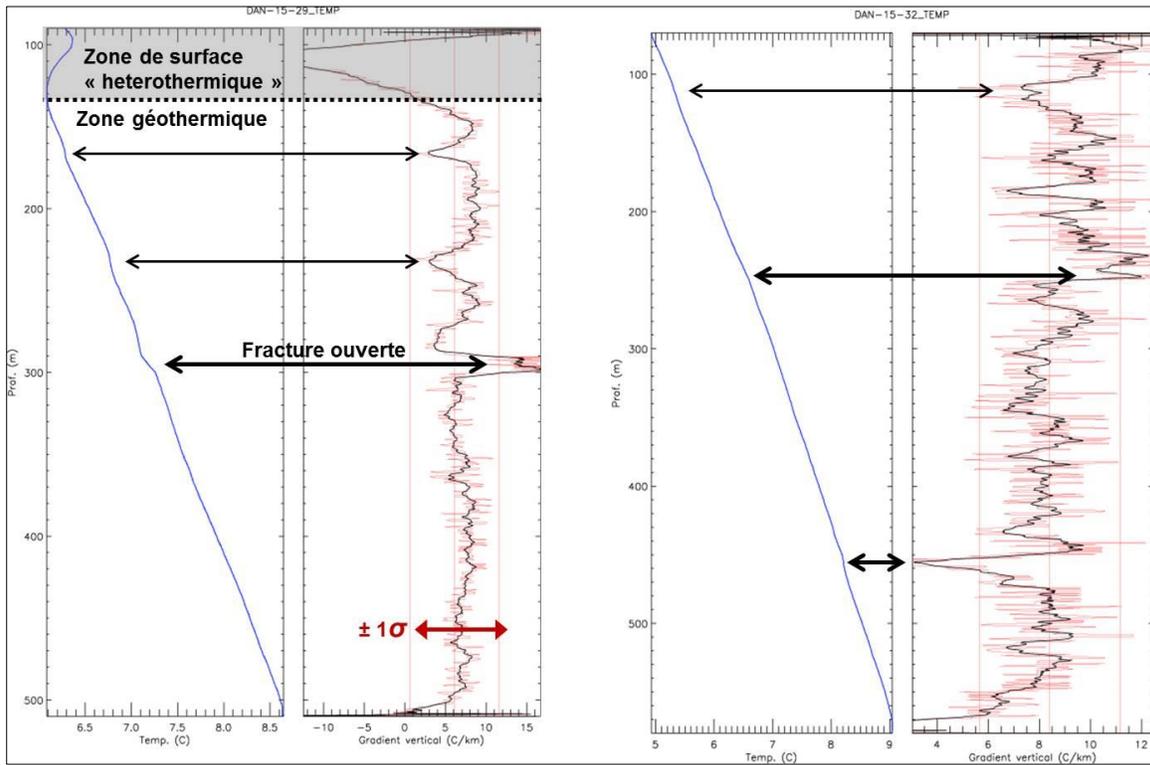


PHOTOS C : Échantillonnage à fort débit avec pompe submersible

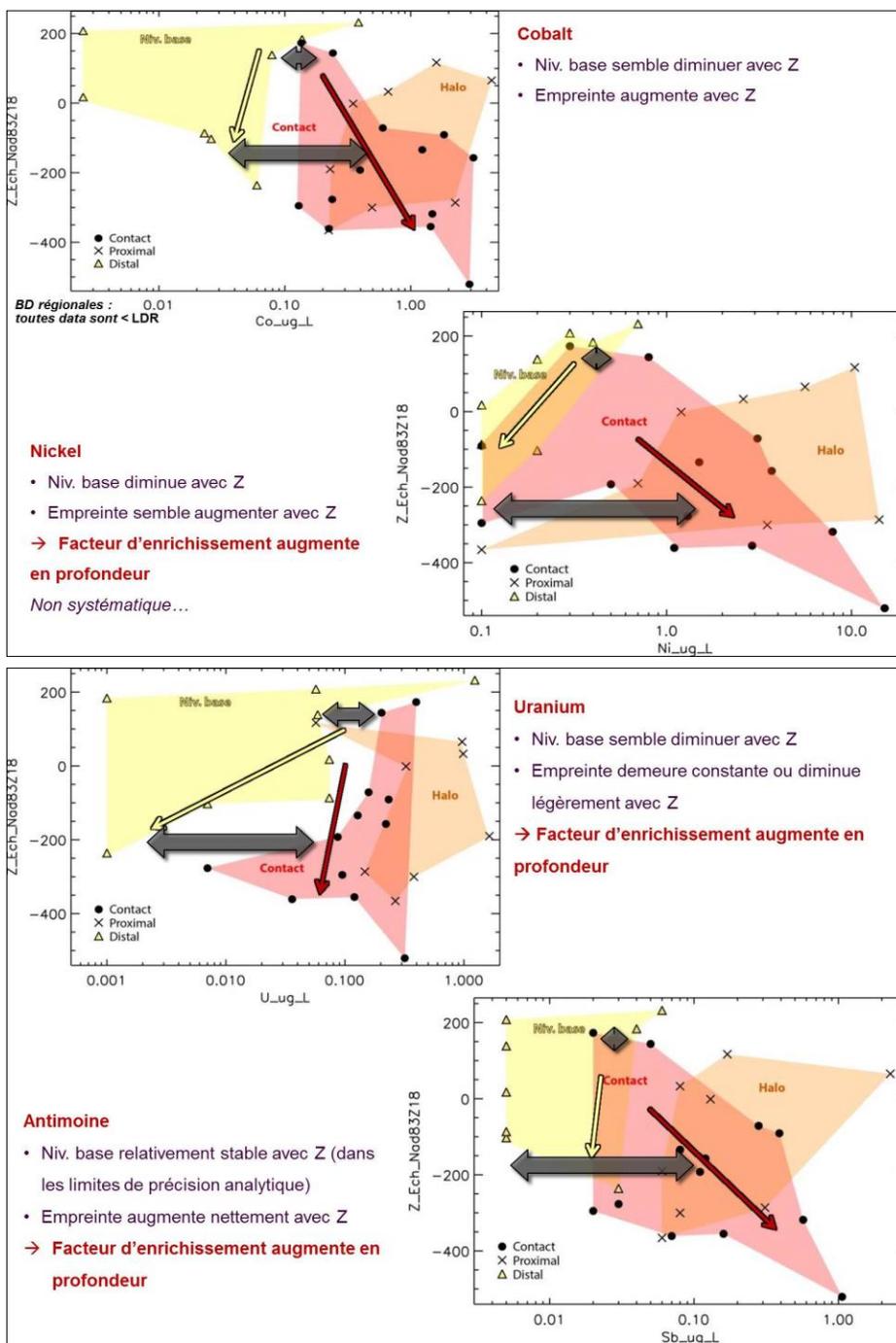


ANNEXE 2 : DETECTION DES FRACTURES OUVERTES PAR L'ANALYSE 3D DES PROFILS DE TEMPERATURE

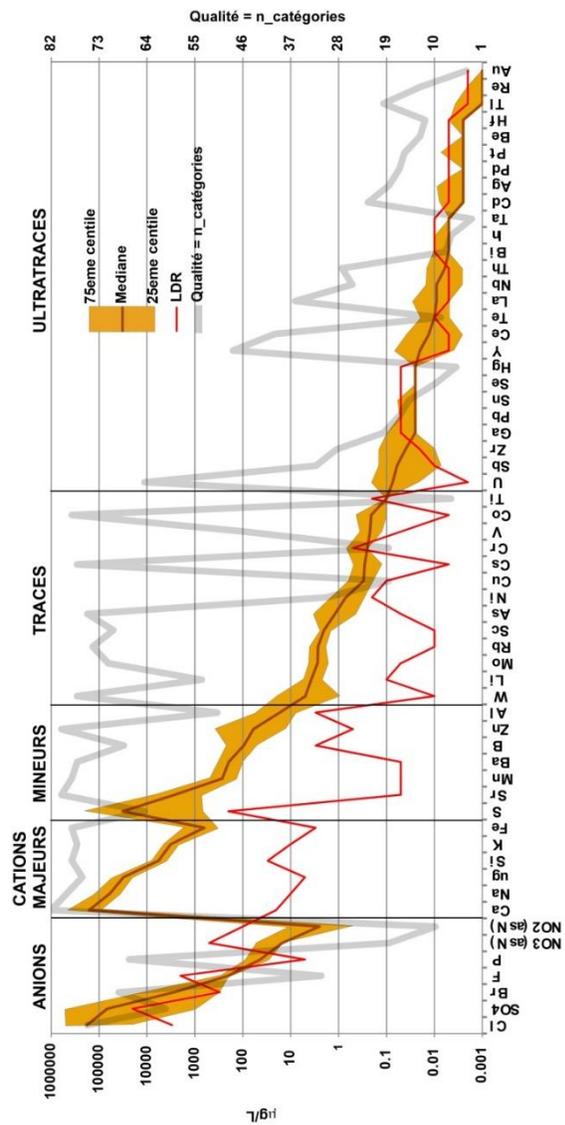




ANNEXE3 : DIAGRAMMES CONCENTRATION VERSUS ELEVATION VERTICALE (PROFONDEUR)

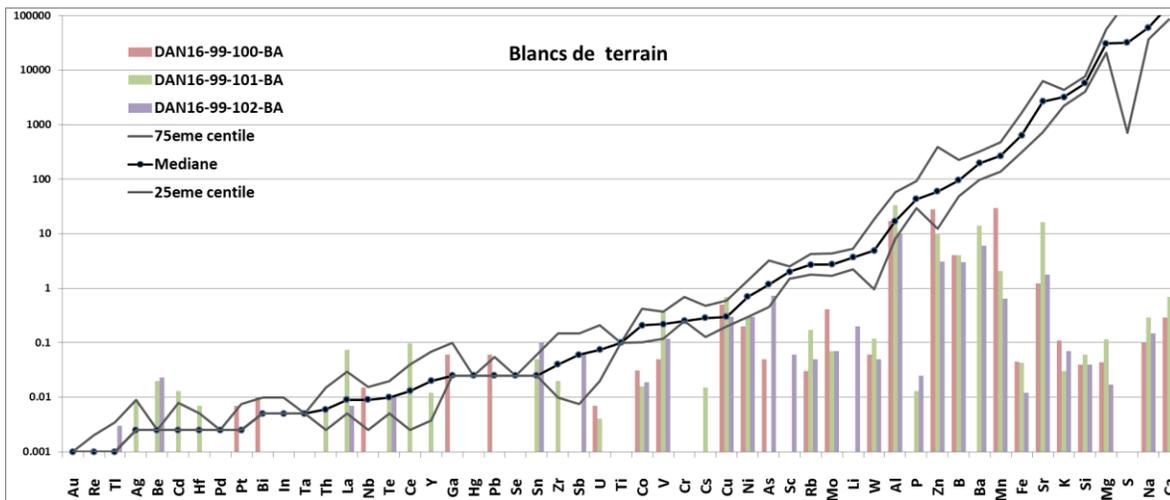
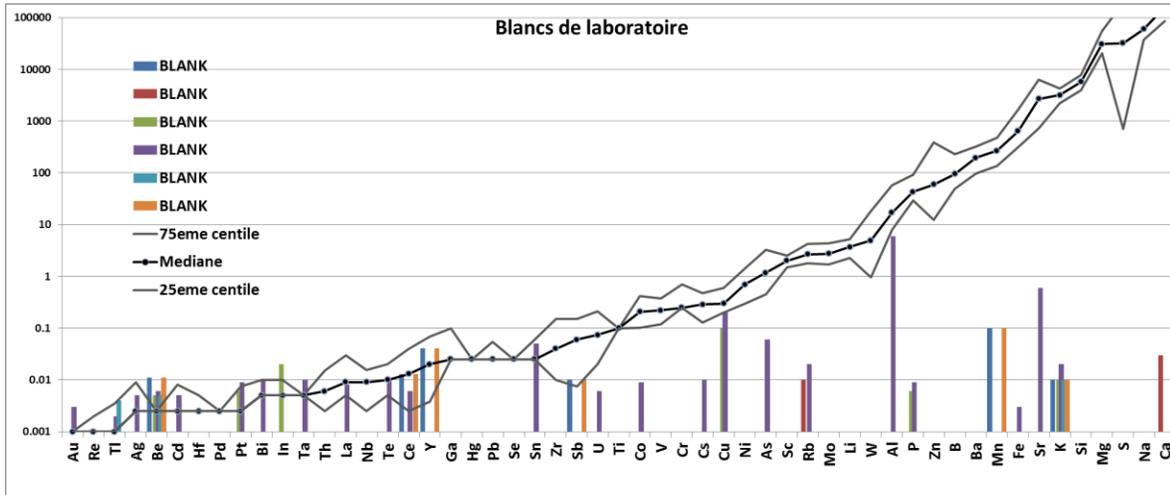


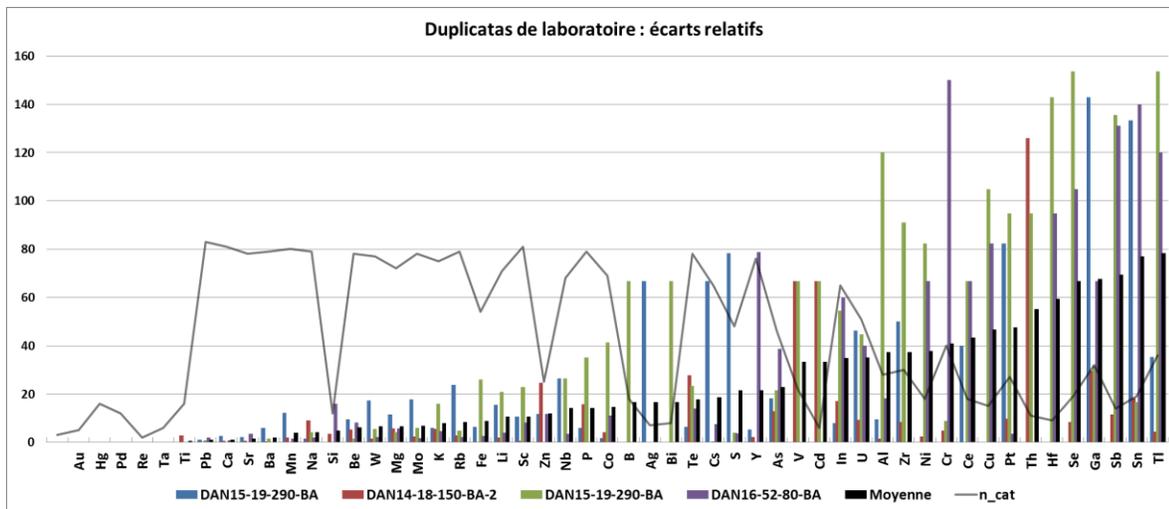
ANNEXE 4 : STATISTIQUES DE BASE DES VALEURS OBTENUES



	Moyenne	Mediane	25eme centile	75eme centile	10eme centile	LDR	n_sous LDR	n_cat
Conductivity uS/cm	2540.434	1360	649	2595	552		2	79
TDS_mg/L	1869.711	972	408.5	2190	337.2		3	75
pH	8.019	8.1	7.9	8.3	7.72		0	13
Alkalinity Total_mg/L CaCO3eq	214.892	176	109.5	320	65.4	1	2	75
Cl_mg/L	636.816	178	19.25	499.5	2.62	3	6	76
SO4_mg/L	293.678	66.9	1	518.5	0.25	20	24	61
Br_mg/L	10.366	2.69	0.32	8.65	0.142	0.3	10	70
F_mg/L	0.260	0.2	0.195	0.28	0.1	2	39	31
P_mg/L	0.084	0.043	0.0295	0.0915	0.0174	0.005	1	68
NO3 (as N)_mg/L	0.040	0.015	0.014	0.05	0.0025	0.5	67	18
NO2 (as N)_mg/L	0.007	0.0025	0.0005	0.01	0.0005	0.1	80	9
Ca_mg/L	388.989	160	86.55	479.5	61.56	0.02	0	83
Na_mg/L	129.229	59.9	37.05	129	27.84	0.01	0	80
Mg_mg/L	53.782	30.8	20.6	55.45	14.5	0.005	0	77
Si_mg/L	6.186	5.71	3.995	7.735	2.896	0.03	0	79
K_mg/L	4.908	3.19	2.21	4.315	1.78	0.01	0	78
Fe_mg/L	2.056	0.637	0.3145	1.6575	0.1546	0.003	0	79
S_mg/L	110.029	31.9	0.7	196.25	0.2	0.2	4	65
Sr_mg/L	8033.439	2670	727.5	6265	504	0.05	0	81
Mn_mg/L	374.181	267	137.75	479	57.56	0.05	0	79
Ba_mg/L	314.241	196	96	323	51	0.05	1	78
B_mg/L	282.518	95	49	227	34	3	0	69
Zn_mg/L	301.269	59.7	12.4	390.5	4.78	0.5	0	81
Al_mg/L	134.819	17	8	57	5.2	3	2	51
W_ug/L	25.195	4.92	0.96	18.325	0.592	0.01	0	78
Li_ug/L	4.792	3.7	2.25	5.25	1.36	0.1	2	54
Mo_ug/L	5.220	2.74	1.69	4.37	0.842	0.05	0	72
Rb_ug/L	4.003	2.68	1.775	4.2	1.302	0.01	0	75
Sc_ug/L	2.120	2.01	1.48	2.52	1.06	0.01	2	71
As_ug/L	7.822	1.18	0.45	3.25	0.166	0.05	3	76
Ni_ug/L	1.551	0.7	0.3	1.4	0.12	0.2	9	30
Cu_ug/L	0.790	0.3	0.2	0.6	0.1	0.1	3	18
Cs_ug/L	0.473	0.286	0.1275	0.4715	0.0472	0.005	2	78
Cr_ug/L	1.725	0.25	0.25	0.7	0.25	0.5	43	18
V_ug/L	0.355	0.22	0.12	0.37	0.06	0.05	5	46
Co_ug/L	0.442	0.208	0.102	0.4205	0.0236	0.005	2	79
Ti_ug/L	4.178	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2	68	6
U_ug/L	0.276	0.074	0.02	0.212	0.007	0.002	4	65
Sb_ug/L	0.152	0.06	0.0075	0.15	0.005	0.01	21	32
Zr_ug/L	0.187	0.04	0.01	0.15	0.01	0.02	23	28
Ga_ug/L	0.069	0.025	0.025	0.1	0.025	0.05	44	19
Pb_ug/L	0.129	0.025	0.025	0.055	0.025	0.05	59	16
Sn_ug/L	0.057	0.025	0.025	0.06	0.025	0.05	50	14
Se_ug/L	0.043	0.025	0.025	0.025	0.025	0.05	74	9
Hg_ug/L	0.032	0.025	0.025	0.025	0.025	0.05	69	5
Y_ug/L	0.066	0.02	0.0038	0.0695	0.0025	0.005	21	48
Ce_ug/L	0.058	0.013	0.0025	0.0395	0.0025	0.005	31	40
Te_ug/L	0.016	0.01	0.005	0.02	0.005	0.01	24	8
La_ug/L	0.035	0.009	0.005	0.0295	0.0025	0.005	19	36
Nb_ug/L	0.014	0.009	0.0025	0.0155	0.0025	0.005	27	25
Th_ug/L	0.021	0.006	0.0025	0.015	0.0025	0.005	32	27
Bi_ug/L	0.010	0.005	0.005	0.01	0.005	0.01	48	7
In_ug/L	0.009	0.005	0.005	0.01	0.005	0.01	56	6
Ta_ug/L	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.01	80	2
Cd_ug/L	0.010	0.0025	0.0025	0.008	0.0025	0.005	53	22
Ag_ug/L	0.011	0.0025	0.0025	0.009	0.0025	0.005	53	18
Pd_ug/L	0.010	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.005	66	16
Pt_ug/L	0.007	0.0025	0.0025	0.0075	0.0025	0.005	45	15
Be_ug/L	0.005	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.005	68	12
Hf_ug/L	0.005	0.0025	0.0025	0.005	0.0025	0.005	60	11
Tl_ug/L	0.006	0.001	0.001	0.0035	0.001	0.002	54	19
Re_ug/L	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	57	12
Au_ug/L	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	74	3

ANNEXE 5 : QAQC





ANNEXE 6 : CARTE DE LOCALISATION DES FORAGES ECHANTILLONNES

